

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : : ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par

Zakaria AMAROUCHE

Thème

Étude d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique

Mémoire soutenu publiquement le 09/10/ 2024 devant le jury composé de :

M^r Rabah ROUAS

MCB, UMMTO, Président

M^r Khoudir MAROUANI

MAB, UMMTO, Encadrant

M^{me} Hassina ABDELLAOUI

MAB, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Le plus grand merci revient avant tout à Dieu, qui, seul, nous a guidés sur le bon chemin tout au long de notre vie et qui nous a donné le courage, la volonté et la force nécessaires pour élaborer ce travail de recherche.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur MAROUANI KHOUDIR, Maître de conférences à l'Université de Tizi Ouzou, pour son excellent encadrement, sa disponibilité, sa gentillesse et ses qualités humaines, ainsi que pour tout ce qu'il m'a apporté durant mon PFE. Merci... Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous les enseignants du département d'électrotechnique de la Faculté de Génie Électrique et Informatique de l'Université Mouloud Mammeri pour leur disponibilité et leurs conseils tout au long de notre cursus.

Je remercie mesdames et messieurs les membres du jury d'avoir accepté d'honorer notre travail par leurs jugements.

Nos sincères sentiments vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet, en particulier à nos chères familles et nos amis.

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.
- Ma chère femme HAYET.
- Ma chère sœur SELMA, et mes frères ABDOU, MOHAMED et AZZEDINE.
- Mes chères petites nièces DANIA et SIRINE.

résumé

Ce mémoire, intitulé "Étude d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique", explore en profondeur la conception et la simulation des systèmes de traction dans les véhicules électriques. Il commence par un état de l'art qui retrace l'évolution historique des véhicules électriques, en mettant en avant les avancées technologiques qui ont permis leur développement, notamment l'électronique de puissance.

Le travail est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente les principes fondamentaux des véhicules électriques, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les technologies et architectures disponibles. Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation des composants de la chaîne de traction, incluant le moteur à courant continu, les convertisseurs, et les régulateurs, tout en abordant les forces de résistance à l'avancement du véhicule.

Le troisième chapitre est dédié à la simulation de la chaîne de traction complète, validant les modèles développés précédemment et présentant les résultats des simulations. Le mémoire conclut en soulignant l'importance de la gestion de l'énergie et de l'hybridation des sources d'énergie, tout en proposant des perspectives pour des recherches futures, notamment la validation expérimentale et l'optimisation des systèmes de propulsion.

Mots clés : Véhicule électrique, Chaîne de traction, Moteur à courant continu, Convertisseur statique, Hacheur, Régulateur, Modèle dynamique du véhicule, Source d'énergie, Batterie, Pile à combustible.

Abstract

This thesis, titled "Study of an Electric Vehicle Powertrain," explores in depth the design and simulation of traction systems in electric vehicles. It begins with a state of the art that outlines the historical evolution of electric vehicles, highlighting the technological advancements that enabled their development, particularly in power electronics.

The work is structured into three chapters. The first chapter presents the fundamental principles of electric vehicles, their advantages and disadvantages, as well as the available technologies and architectures. The second chapter focuses on modeling the components of the powertrain, including the DC motor, converters, and controllers, while addressing the forces of resistance to the vehicle's advancement.

The third chapter is dedicated to simulating the complete powertrain, validating the models developed previously and presenting the results of the simulations. The thesis concludes by emphasizing the importance of energy management and the hybridization of energy sources, while proposing perspectives for future research, particularly in experimental validation and optimization of propulsion systems.

Keywords : Electric vehicle, Traction chain, DC motor, Static converter, Controller, Dynamic vehicle model, Energy source, Battery, Fuel cell.

Table des matières

Introduction générale	1
1 État de l'art des véhicules électriques	3
1 Introduction	3
2 Historique des véhicules électriques	3
3 Avantages du véhicule électrique	5
4 Points faibles du véhicule électrique	5
5 Principe de fonctionnement	6
6 Structures des voitures électrifiées	6
6.1 Véhicules tout électrique (100% électrique)	6
6.1.1 Véhicules électriques mono moteur	6
6.1.2 Véhicules électriques bi moteur	7
6.2 Véhicules hybrides	7
6.2.1 Hybride parallèle	7
6.2.2 Hybride série	8
6.2.3 Hybride à dérivation de puissance	9
6.3 Véhicules hybrides rechargeables	9
7 Les organes de traction électrique	10
7.1 Les moteurs électriques	11
7.1.1 Moteur à courant continu (MCC)	12
7.1.2 Moteur asynchrone (MAS)	12
7.1.3 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)	13
7.1.4 Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)	13
7.1.5 Moteur à réluctance variable	14
7.2 Convertisseurs statiques	15
7.2.1 Les redresseurs (AC/DC)	15

7.2.2	Les hacheurs (DC/DC)	15
7.2.3	Les onduleurs (DC/AC)	16
7.3	Source d'énergie électrique	17
7.3.1	Les batteries	17
7.3.2	Les Supercondensateurs	18
7.3.3	Pile à combustible	19
8	Conclusion	19
2	Modélisation des éléments de la chaîne de traction	21
1	Introduction	21
2	Modélisation du moteur à courant continu	21
2.1	Équations électriques	21
2.2	Équations électromécaniques du MCC	21
2.3	Équations mécaniques	22
2.4	Transformée de la place appliquée aux équations du MCC	22
3	Modélisation du convertisseur statique	23
4	Modèle dynamique du véhicule	23
4.1	Force aérodynamique	24
4.2	Force de résistance au roulement	24
4.3	Force de la pente	24
4.4	Force d'accélération	25
5	Modélisation des sources d'énergie	25
5.1	Modèle de la batterie Li-Ion	25
5.2	Modèle de supercondensateur	26
5.2.1	Tension et énergie à vide	27
5.2.2	Tension et énergie en charge	27
5.2.3	Tension et capacité du Pack de condensateurs	27
5.3	Modèle d'une pile à combustible	28
5.3.1	Chute de tension d'activation	29
5.3.2	Chute de tension ohmique	29
5.3.3	Les chutes de tension par concentration	29
6	Conclusion	30

3	Simulation de la chaîne de traction du véhicule électrique hybride	31
1	Introduction	31
2	Résultats de simulation de la chaîne de traction	31
2.1	Simulation du modèle du MCC	31
2.1.1	Partie électrique	31
2.1.2	Partie mécanique	31
2.2	Schéma bloc de convertisseur	34
2.3	Boucles de régulation	35
2.3.1	Boucle du courant	35
2.3.2	Boucle de vitesse	36
2.4	Modèle dynamique du véhicule	37
3	Résultats de simulation des sources d'alimentation	39
3.1	Deux sources d'alimentation fonctionnant à puissances égales	41
3.2	Deux sources d'alimentation fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle	42
4	Modèle complet de la chaîne de traction du véhicule	44
5	Présentation d'un exemple d'un modèle du véhicule électrique disponible dans la bibliothèque du Matlab	47
5.1	Pilote longitudinal	49
5.2	Commande du moteur	49
5.3	H-Bridge	49
5.4	Contrôle MLI	50
5.5	Moteur à courant continu	50
5.6	Caisse du véhicule électrique	51
5.6.1	Le pneu Magic Formula	51
5.6.2	Véhicule body	51
5.6.3	Simple Gear	52
6	Conclusion	53
	Conclusion générale	54
	Annexe	55

Table des figures

1.1	Exemple des voitures électriques du début du siècle[2].	4
1.2	Schéma synoptique d'une chaîne de traction[3].	6
1.3	Architectures d'un véhicule électrique mono moteur[22].	7
1.4	Architectures d'un véhicule électrique bi moteur[22].	7
1.5	Architectures de type hybride parallèle[22].	8
1.6	Architectures de type hybride série[1].	9
1.7	Architectures de type hybride série/parallèle, données de la Toyota Prius 4[1].	9
1.8	Architectures de type hybride rechargeable, données du Renault Captur[4].	10
1.9	Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique[20].	11
1.10	Associations moteurs-convertisseurs possibles[12].	12
1.11	Le schéma d'un onduleur triphasé branché au moteur[11].	17
1.12	(a) Condensateur (b) Supercondensateur[21].	19
1.13	Schéma d'une PâC[19].	19
2.1	Schéma de base du hacheur Buck[9].	23
2.2	Représentation du véhicule et les forces agissantes sur lui[13].	24
2.3	Schéma équivalent d'une batterie[14][10].	26
2.4	Schéma équivalent du supercondensateur[14][10].	26
2.5	Schéma équivalent d'une pile à combustible[14][10].	28
3.1	Schéma bloc du modèle du MCC sous Matlab/Simulink.	32
3.2	Allure de la vitesse de rotation du moteur Ω	32
3.3	: Allure de couple électromagnétique C_{em}	33
3.4	: Allure de courant d'induit I	33
3.5	Allure de la tension d'alimentation U et la f.e.m	34
3.6	Schéma bloc du modèle de convertisseur sous Matlab/Simulink.	34
3.7	Allure de signal de commande et la tension d'alimentation.	35

3.8	Schéma bloc de la boucle du courant.	36
3.9	: Allure du courant de référence et du courant mesuré.	36
3.10	Schéma bloc de la boucle de vitesse.	37
3.11	Allure de la vitesse de référence et la vitesse mesurée.	37
3.12	Schéma bloc du modèle dynamique du véhicule.	38
3.13	Allure de la force de traction et du couple résistant Cr.	39
3.14	Schéma bloc du modèle de la batterie	40
3.15	Résultats de simulation aux bornes de la batterie et la charge.	40
3.16	Schéma bloc du modèle de la pile à combustible.	40
3.17	Résultats de simulation aux bornes de la pile à combustible et la charge.	41
3.18	Schéma bloc des deux sources fonctionnant à puissances égales.	41
3.19	Résultats de simulation des deux sources fonctionnant à puissances égales.	42
3.20	Schéma bloc des deux sources fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle.	42
3.21	Résultats de la séparation fréquentielle.	43
3.22	Résultats de simulation des deux sources fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle.	43
3.23	Schéma bloc de la chaîne de traction complète du véhicule électrique.	45
3.24	Allure de la tension du bus continu et la vitesse de rotation.	46
3.25	Le schéma bloc de la chaîne de traction disponible dans la bibliothèque du Matlab	48
3.26	Longitudinal Driver.	49
3.27	Commande de moteur.	49
3.28	H-Bridge.	50
3.29	Controlled PWM Voltage.	50
3.30	DC Motor.	51
3.31	Tire (Magic Formula).	51
3.32	Vehicle Body.	52
3.33	Simple Gear.	52

Introduction générale

La révolution industrielle, qui s'est produite aux 18e et 19e siècles, a été témoin d'une utilisation croissante des combustibles fossiles dans divers domaines technologiques, notamment les transports et la mobilité. Le charbon était au centre de la scène lors de sa phase initiale avant que la plupart des gens ne recourent au pétrole en raison de ses propriétés, disponibilité et capacité à répondre à la demande énergétique dans des domaines essentiels tels que le transport et la fabrication, offrant également des avantages économiques évidents. Cependant, cette dépendance généralisée aux énergies fossiles a entraîné une série de conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en contribuant de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre issues des moteurs à combustion interne, ce qui a des répercussions importantes sur le changement climatique[1].

Au cours des deux derniers siècles, les activités humaines ont entraîné une augmentation significative des émissions de gaz polluants, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), amplifiant ainsi le phénomène naturel de l'effet de serre et contribuant à un réchauffement planétaire. Cette hausse des températures a des répercussions majeures sur le climat et les écosystèmes mondiaux. En réponse à cette préoccupation croissante, la communauté internationale s'est engagée à réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'objectif est de réduire de moitié les émissions mondiales d'ici 2050, dans le but de limiter les effets néfastes sur l'environnement et sur la biodiversité de la Terre [2] [3].

Les avancées technologiques se poursuivent, notamment avec l'introduction de nouveaux composants d'électronique de puissance et de moyens de stockage de l'énergie, ce qui a permis l'électrification des moyens de transport, offrant ainsi une alternative plus respectueuse de l'environnement pour les déplacements. Cependant, il reste encore un effort significatif à fournir pour exploiter pleinement le potentiel du véhicule électrique à l'échelle mondiale. Cela nécessite notamment des investissements dans la recherche et le développement, ainsi que des politiques publiques favorables pour encourager l'adoption et l'infrastructure nécessaire à grande échelle[8].

Les véhicules électriques offrent une solution efficace et tangible pour réduire l'impact environnemental du transport. Avec aucune émission de gaz ni de particules, ainsi qu'une conduite silencieuse, ils représentent un élément essentiel dans le paysage des transports urbains durables, aux côtés des trains, des tramways, des bus et des vélos. Ils s'adaptent parfaitement aux habitudes de déplacement des conducteurs effectuant des trajets, principalement à l'intérieur des limites de la ville[15].

Actuellement, les véhicules électriques utilisent des machines électriques pour leur propulsion, ainsi que des batteries, des supercondensateurs ou des piles à combustible comme principales sources d'énergie. Parmi ces machines, on retrouve les moteurs à courant continu, les moteurs synchrones, et plus particulièrement les moteurs synchrones à aimants permanents, à réluctance variable, ainsi que les moteurs asynchrones à cage.

La simulation est devenue une étape incontournable pour concevoir, caractériser, contrôler ou surveiller tout processus. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à la simulation d'une chaîne de traction du véhicule électrique sous l'environnement MATLAB/Simulink. Cet outil de simulation nous a permis d'étudier le comportement dynamique et électrique du véhicule.

Le travail réalisé est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les véhicules électriques, en abordant divers sujets tels que leur histoire, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les technologies et architectures disponibles. Nous avons également présenté leur fonctionnement et les composants essentiels, y compris les différents types des moteurs, leurs convertisseurs statiques et les sources d'énergie utilisées. Cette exploration est cruciale pour une compréhension approfondie du sujet. Ainsi, ce chapitre pose une base pour la suite du travail, fournissant aux lecteurs un aperçu des principaux aspects des véhicules électriques. Dans le second chapitre, une modélisation des éléments de chaque sous-système (moteur à courant continu, convertisseurs DC/DC, le modèle dynamique du véhicule et les sources d'énergies) est établie. ce qui nous donnera une vue approximative de la nature des techniques de commande à réaliser.

Le troisième chapitre, sera consacré à la simulation des différentes composantes de véhicule électrique ainsi que la chaîne de traction complète.

En fin, nous avons terminé notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1

État de l'art des véhicules électriques

1 Introduction

Le domaine de l'automobile voit désormais une présence notable des véhicules électriques, soutenue par les avancées technologiques, les politiques gouvernementales incitatives, une gamme étendue d'offres et une perception positive des conducteurs. Cette innovation a graduellement gagné en légitimité comme une alternative viable de transport au fil des ans. Bien que l'idée d'utiliser l'électricité pour propulser des véhicules ne soit pas nouvelle et remonte aux débuts de l'automobile, la réussite dans ce secteur dépend d'une combinaison complexe de vision scientifique de pointe et d'une expertise technologique approfondie. Dans cet équilibre, l'électricité joue un rôle crucial, contribuant à atteindre les nouveaux objectifs de l'industrie automobile en termes de sécurité, de confort et de respect de l'environnement. Dans ce premier chapitre, l'objectif est de donner un aperçu complet des véhicules électriques, en décrivant leurs diverses configurations, leur architecture et les éléments constitutifs de leur système de propulsion. De plus, elle aborde le fonctionnement de base de ces véhicules ainsi que les défis liés aux évolutions économiques et environnementales.

2 Historique des véhicules électriques

L'histoire des véhicules électriques trouve ses racines en Europe au début du 19e siècle. Après les avancées majeures telles que l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique par Faraday en 1821, le premier véhicule électrique a vu le jour en 1834 à Brandon, en Grande-Bretagne, grâce à Thomas Davenport, un mécanicien [6]. Ce premier modèle fonctionnait avec une batterie non-rechargeable et était capable de réaliser de courts trajets sur rail. Par la suite, en 1859, le Français Gaston Planté a révolutionné le domaine en inventant la batterie secondaire au plomb/acide, offrant ainsi la possibilité de recharge. En 1869, Gramme a franchi une étape décisive en construisant le premier moteur électrique à courant continu, surpassant les capacités précédentes. Puis, en 1881, Gustave Trouvé a marqué l'histoire en réalisant le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire[2].

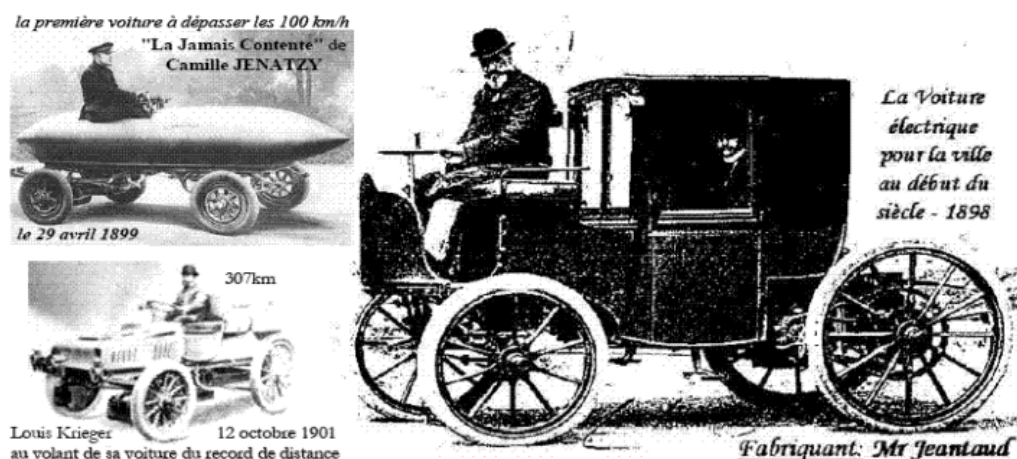


FIGURE 1.1 – Exemple des voitures électriques du début du siècle[2].

Propulsé par un moteur électrique à courant continu d'une puissance de 0,1 cheval, le véhicule pesait 160 kg avec son conducteur. Plus tard, il a été suivi par David Salomon, qui a construit un véhicule électrique avec une batterie rechargeable en 1874. Pendant ce temps, les Allemands Daimler et Benz faisaient leur marque en inventant la première voiture à essence[2].

Sans doute, le début du 20^e siècle a marqué l'apogée des véhicules électriques. C'est durant cette période qu'un véhicule électrique a pour la première fois franchi la barre des 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy aux commandes de sa voiture baptisée "La Jamais Contente", qui arborait la forme d'un obus. Ce véhicule était équipé de deux moteurs entraînant directement les roues arrière, offrant une puissance maximale totale de 50 KW (équivalent à 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen, pesant près de la moitié du poids total du véhicule, qui était de 1,5 tonne[2][6].

En 1901, deux ans après, le 12 octobre, l'ingénieur français Louis Krieger réalisait un exploit remarquable en parcourant le trajet Paris-Châtellerauld sans avoir besoin de recharger sa voiture électrique. Cette traversée de 307 km s'est effectuée à une vitesse moyenne de 17,5 km/h.

Son exploit lui a valu une reconnaissance notoire parmi les constructeurs de véhicules électriques les plus influents du début du siècle. De nouvelles perspectives ont émergé dans le domaine de la traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell ont introduit le transistor, suivi ultérieurement par l'avènement des thyristors, capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces avancées ont ouvert la voie au développement de l'électronique de puissance, offrant la possibilité de remplacer les rhéostats et de contrôler les moteurs à courant alternatif à fréquence variable[2].

Entre les années 1960 et 1990, en réponse à la pollution atmosphérique et aux chocs pétroliers des années 1970 et 1980, de nombreux pays ont commencé à se tourner vers les véhicules électriques (VE). Les recherches ont été ravivées et une petite quantité de VE a commencé à réapparaître. L'apogée de la première moderne du VE s'est située entre les années 1980 et 1990, avec quelques modèles notables tels que l'EV1 de GM et la Peugeot 106

Électrique. Malgré les avancées, il est devenu évident dans les années 1990 que les VE ne pouvaient pas rivaliser avec les véhicules conventionnels en raison de leurs limitations en autonomie et en performances. Comme au début du 20^e siècle, le principal obstacle à leur développement demeure la source de stockage d'énergie, à savoir la batterie[2][6].

3 Avantages du véhicule électrique

Le fonctionnement de la voiture électrique est pratiquement la solution idéale pour de nombreux points[23] :

l'absence de pollution : les émanations sont inexistantes, tout comme la pollution sonore.

les performances : contrairement à ce que l'on peut croire, le moteur électrique est très performant, son rendement théorique avoisine 100% (35% pour les moteurs thermiques). Il possède un couple maximal sur toute la plage de régime moteur, favorisant les accélérations (en comparaison dans un moteur thermique, le couple est maximal seulement à un régime moteur donné, soit entre 1 500 et 2 000 tr/mn)[23].

l'entretien : le moteur électrique est d'une conception simple, avec peu d'éléments mécaniques en mouvement, contrairement aux voitures thermiques, notamment les dernières générations et leurs systèmes antipollution, complexes et onéreux à l'entretien[23].

Le carburant est plus cher que l'électricité : Il n'est plus nécessaire de prouver que l'électricité est effectivement moins chère que le carburant, et les économies de coûts sont très intéressantes quand on calcule sa consommation à long terme : pour un total de 20 000 kilomètres parcourus sur une année, les coûts de consommation d'énergie sont les suivants : une voiture à essence coûte 1 740 €, une voiture diesel 1 620 €, tandis qu'une voiture électrique n'engendre qu'un coût de 450 €, soit environ trois fois moins[23].

4 Points faibles du véhicule électrique

Si la voiture électrique possède beaucoup de qualités, il faut garder quelques limites à l'esprit [23] :

L'impact environnemental : malgré les aides gouvernementales favorisant l'achat de ce type de véhicule considéré peu polluant, il faut prendre en compte différents impacts de sa conception (notamment la production des batteries) en passant par son utilisation (avec la prise en compte des émanations produites par les centrales électriques nécessaires à la recharge des mêmes batteries) et son recyclage (difficile notamment toujours à cause des batteries très polluantes), l'impact global est comparable à celui des véhicules thermiques[23].

L'autonomie : malgré les progrès constants, elle reste toujours limitée en situation réelle, restreignant d'autant son rayon d'action (entre 300 et 500 km)[23].

Le coût d'achat : bien que le prix d'achat net d'un véhicule électrique soit aujourd'hui abordable, il est conditionné par les primes gouvernementales (jusqu'à 6 000 € ou jusqu'à 11 000

€ avec la prime à la conversion)[23] .

5 Principe de fonctionnement

Les véhicules électriques sont équipés d'un moteur électrique alimenté par une batterie de grande capacité. Par conséquent, toutes les phases de conduite sont entièrement électriques. Bien que la batterie puisse se recharger partiellement pendant la conduite, sa grande capacité exige qu'elle soit impérativement rechargée par l'utilisateur sous peine d'immobiliser le véhicule. La batterie d'un véhicule électrique peut être branchée sur une prise secteur (courant alternatif) ou sur une borne de recharge (courant alternatif ou continu)[3].

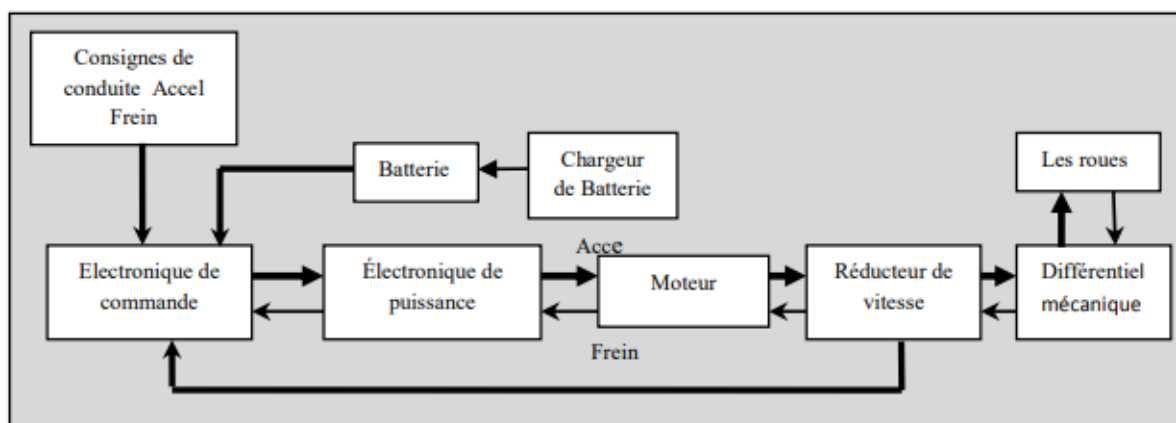


FIGURE 1.2 – Schéma synoptique d'une chaîne de traction[3].

6 Structures des voitures électrifiées

6.1 Véhicules tout électrique (100% électrique)

Pour propulser un véhicule électrique, il existe deux types de moteurs : les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif.

6.1.1 Véhicules électriques mono moteur

Ce système se compose d'une architecture avec un moteur, une batterie, un variateur, ainsi qu'un réducteur différentiel[22].

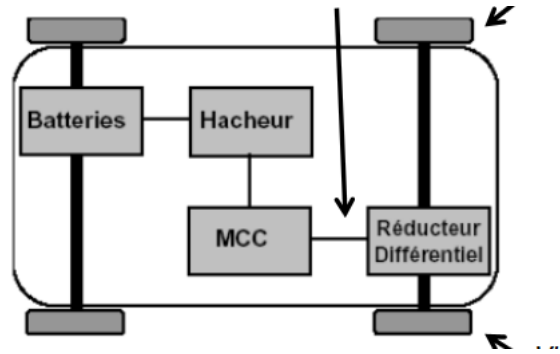


FIGURE 1.3 – Architectures d'un véhicule électrique mono moteur[22].

6.1.2 Véhicules électriques bi moteur

Dans cette configuration, la chaîne énergétique est doublée. Il s'agit d'une architecture avec une batterie, deux variateurs et deux machines électriques.

Le hacheur est utilisé pour convertir le courant électrique continu fourni par la batterie en courant continu nécessaire au moteur de la voiture électrique[22].

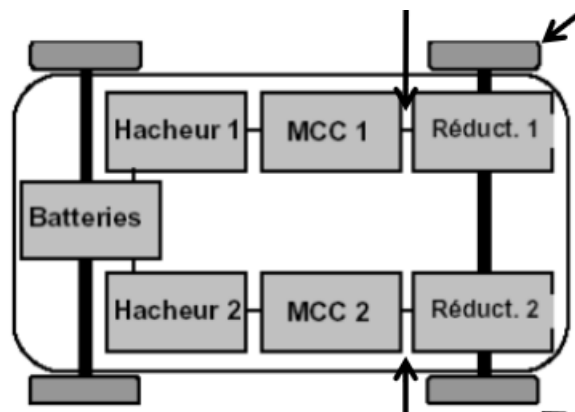


FIGURE 1.4 – Architectures d'un véhicule électrique bi moteur[22].

6.2 Véhicules hybrides

6.2.1 Hybride parallèle

Dans un véhicule hybride parallèle, le couple généré par le moteur électrique se combine à celui du moteur thermique. Le moteur électrique peut être positionné entre le moteur à combustion et la transmission (configuration hybride à transmission avant), entre la transmission et les roues (configuration hybride à post-transmission), ou directement sur les roues arrière pour la traction (configuration hybride "through the road"), permettant ainsi un mode de transmission intégrale sans recourir à un arbre de transmission encombrant et coûteux traversant le véhicule[22].

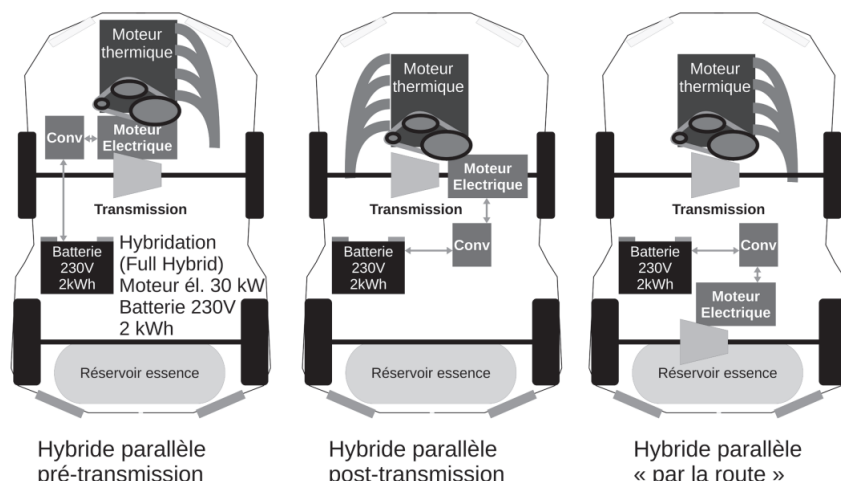


FIGURE 1.5 – Architectures de type hybride parallèle[22].

La DS5 Hybrid 4 et la Peugeot 508 Hybrid 4 sont des exemples d'hybrides parallèles pour la route, équipés d'un moteur électrique de 27 kW monté sur le train arrière.

Dans un véhicule hybride parallèle, la puissance maximale résulte de l'addition de la puissance du moteur thermique et du moteur électrique. Cette configuration permet aux véhicules économiques de disposer d'un moteur thermique de cylindrée réduite par rapport à un véhicule thermique de même puissance[1].

6.2.2 Hybride série

Dans un véhicule hybride série, le moteur à combustion est exclusivement utilisé pour entraîner le générateur afin de charger la batterie. Cette dernière alimente ensuite le moteur électrique et recharge la batterie pendant la conduite. Le moteur thermique fonctionne de manière totalement indépendante de l'arbre de transmission, opérant dans une plage proche de son rendement optimal et ne nécessitant pas de boîte de vitesses[1].

Cette configuration suppose la présence d'un moteur électrique offrant la puissance maximale du véhicule, ainsi qu'un moteur thermique et un alternateur dimensionnés pour la puissance nominale du véhicule, généralement adaptée à des situations telles que les longues montées sur autoroute[1].

C'est pourquoi les voitures de tourisme hybride série sont rares. Nissan propose les modèles Note et Serena e-Power au Japon en tant qu'hybride série, avec un moteur à combustion interne et un générateur de 58 KW (78 ch), avec une consommation annoncée de 2,94 L/100 Km[1].

L'avantage de cette technologie réside dans la capacité du moteur thermique à fonctionner avec une efficacité maximale quel que soit le trajet, ce qui trouve un avantage particulier dans les bus urbains. Le bus BAE Systems Serie E est un exemple notable de ce type de système hybride série[1].

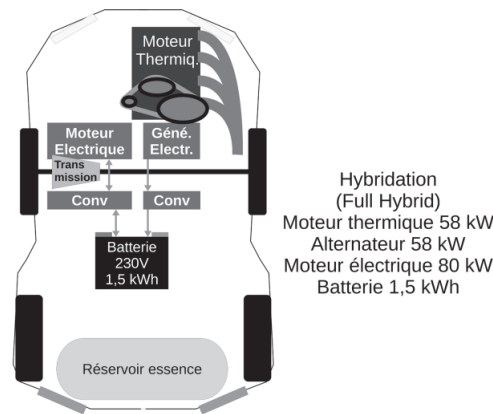


FIGURE 1.6 – Architectures de type hybride série[1].

6.2.3 Hybride à dérivation de puissance

Les hybrides parallèles visent à améliorer la puissance du moteur électrique, tandis que les hybrides série permettent au moteur thermique de fonctionner avec une efficacité maximale, même lorsque le véhicule est à l'arrêt. L'intégration de moteurs électriques dans des réducteurs complexes peut combiner ces deux avantages, dans ce qu'on appelle la dérivation de puissance ou la technologie série/parallèle[1].

Dans cette configuration, la puissance du moteur électrique peut être inférieure à la puissance nominale du véhicule, et la puissance de l'alternateur peut être sensiblement réduite. Cette approche est notamment adoptée par des véhicules tels que la Renault Clio ou divers hybrides de Toyota. La Figure 1.7 illustre l'une des nombreuses variantes de mélangeurs de puissance modernes[1].

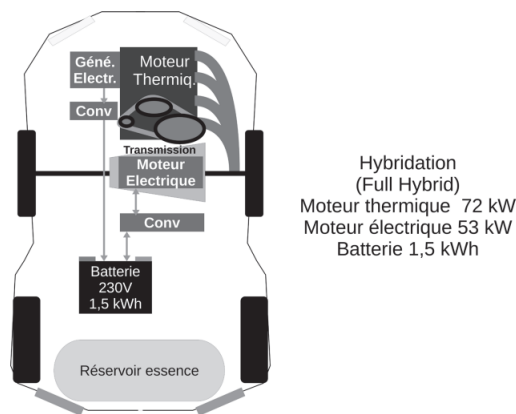


FIGURE 1.7 – Architectures de type hybride série/parallèle, données de la Toyota Prius 4[1].

6.3 Véhicules hybrides rechargeables

Dans un véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV : Plug-in Hybrid Electric Vehicle), on retrouve la même architecture que celle des hybrides parallèles ou série, mais avec une

batterie plus importante pouvant être chargée sur secteur. Cette batterie offre une autonomie tout électrique suffisante pour les trajets quotidiens urbains ou périurbains, généralement entre 40 et 60 km pour les modèles les plus récents[4].

Par exemple, la Renault Captur e-Tech est équipé d'un moteur hybride similaire à celui de la Clio, associé à une batterie de 9,8 kWh. Ce véhicule annonce une autonomie électrique de 50 km selon le cycle mixte WLTP[4].

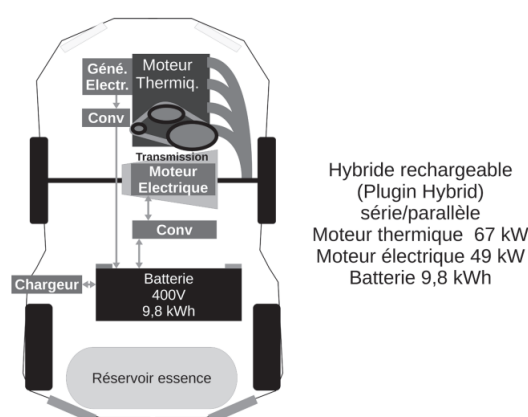


FIGURE 1.8 – Architectures de type hybride rechargeable, données du Renault Captur[4].

En tant qu'hybride rechargeable "plug-in" bénéficiant d'une propulsion électrique sur la majeure partie de son cycle, la consommation de carburant déclarée selon le cycle WLTP est très faible, comme par exemple 2,2 L/100 km pour la DS7 Crossback. Cependant, si le propriétaire de la voiture ne charge pas régulièrement sa batterie, la consommation sera similaire à celle d'une voiture thermique équivalente, voire même plus élevée en raison du surpoids de la batterie. La consommation réelle est donc fortement influencée par l'usage de l'utilisateur, qui doit recharger régulièrement son véhicule pour bénéficier de la faible consommation annoncée[4].

7 Les organes de traction électrique

La chaîne de traction électrique constitue le cœur du véhicule électrique. Nous nous focaliserons uniquement sur la chaîne de traction en elle-même, bien que l'optimisation de l'ensemble des équipements électriques soit cruciale pour maximiser l'autonomie du véhicule[20][3].

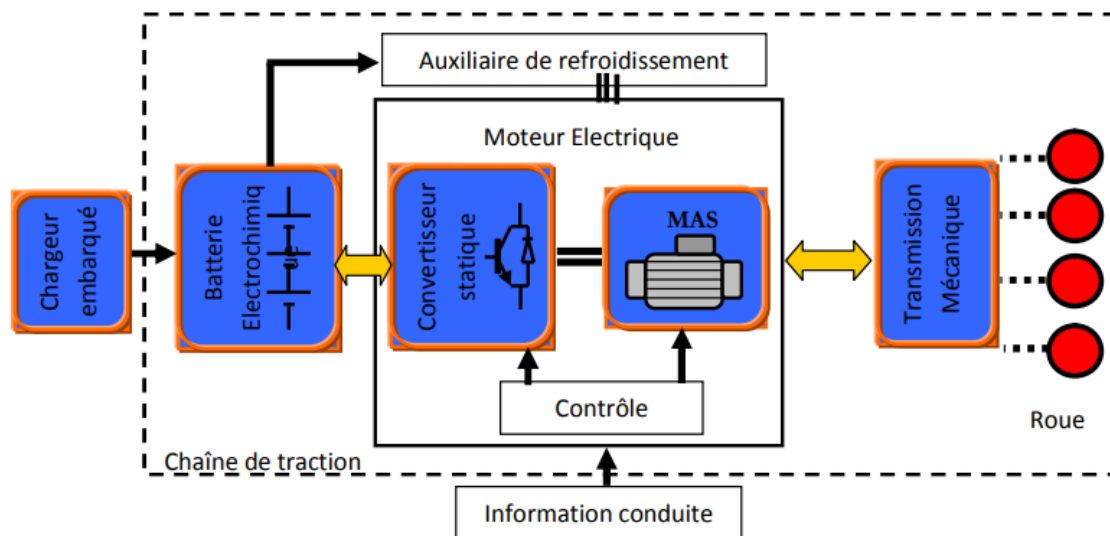


FIGURE 1.9 – Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique[20].

7.1 Les moteurs électriques

L'amélioration des performances des moteurs électriques est étroitement liée à la réalisation de performances élevées des véhicules électriques en conditions d'utilisation. Ainsi, les activités de recherche et développement sur les moteurs représentent une voie de recherche essentielle. Trois grandes familles de moteurs électriques sont généralement distinguées pour les véhicules électriques [25][12] :

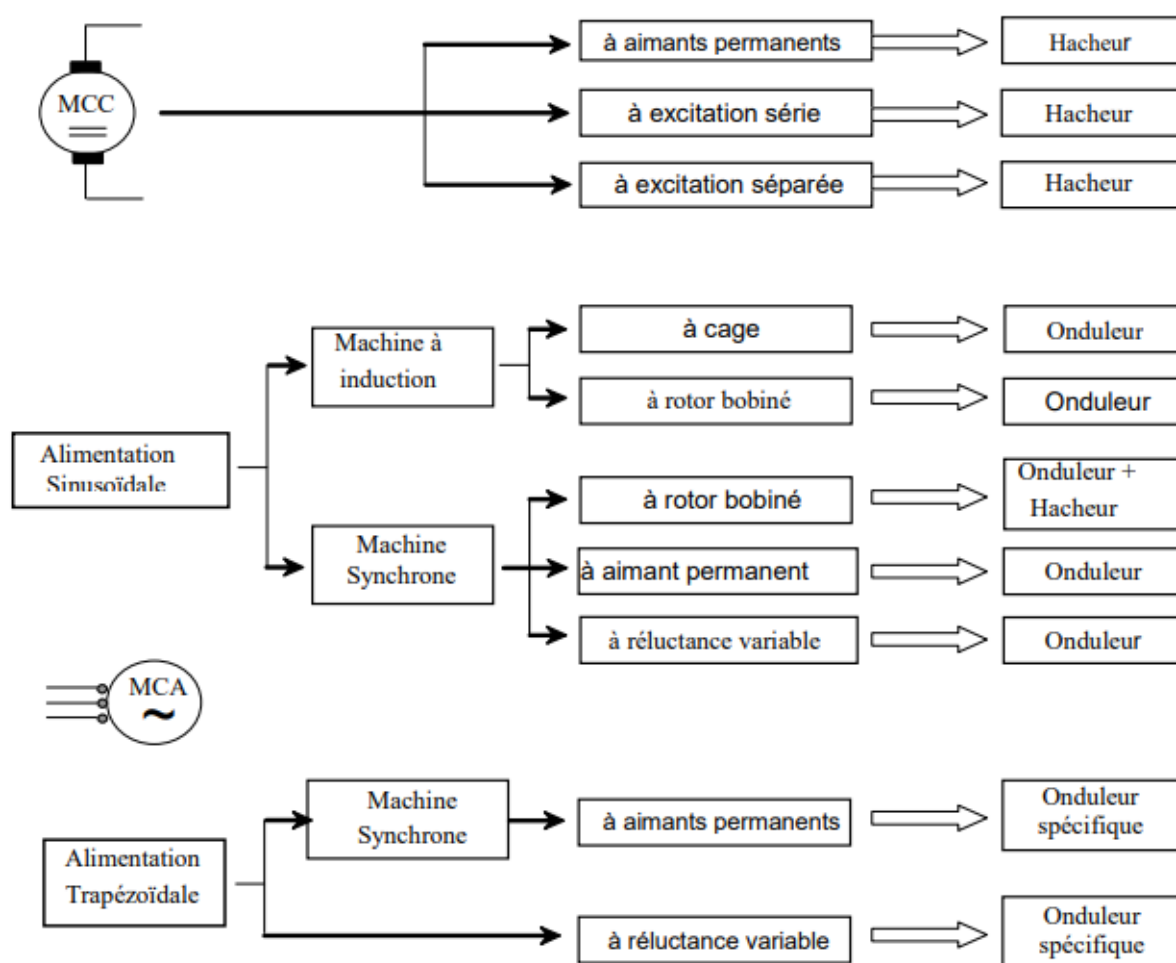


FIGURE 1.10 – Associations moteurs-convertisseurs possibles[12].

7.1.1 Moteur à courant continu (MCC)

Les moteurs à courant continu sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. Leur principal avantage réside dans leur capacité à être contrôlés de manière flexible, continue et presque instantanée en termes de vitesse[16]. Les moteurs à courant continu présentent des modes d'excitation similaires à ceux des génératrices. On distingue ainsi les moteurs à excitation série, qui ont été les premiers à être utilisés dans les véhicules électriques en raison de leur adaptabilité fiable. Dans ces moteurs, le champ magnétique est généré par des électroaimants, et les enroulements sont connectés en série avec l'armature, permettant à un même courant électrique de les traverser. Il existe également les moteurs à excitation shunt et les moteurs à excitation séparée[16].

7.1.2 Moteur asynchrone (MAS)

Pour les applications de traction électrique à grande vitesse, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé en remplacement du moteur de traction à courant continu. Dans ce type

de moteur, la puissance mécanique est générée par un transfert de puissance par induction électromagnétique du stator vers le rotor. Ces moteurs, de construction simple, sont peu coûteux et ne nécessitent pas d'entretien. Leur vitesse de rotation maximale n'est pas limitée par les frottements des balais, mais seulement par les forces centrifuges maximales que le rotor peut supporter. Ainsi, une réduction de taille est possible même à puissance équivalente, car il suffit d'augmenter la vitesse de rotation du rotor[16].

Le moteur asynchrone est le choix le plus adapté pour propulser les véhicules hybrides électriques; le contrôle de la machine asynchrone est réalisé par commande vectorielle et est géré par microprocesseur.

Les avantages du moteur asynchrone sont les suivants[16] :

- Construction mécanique plus robuste (absence de collecteur);
- Dimensions et poids réduits pour une puissance équivalente;
- Puissance plus élevée pour les mêmes dimensions;
- Vitesse de rotation maximale plus élevée;
- Aucun entretien nécessaire, car il n'y a pas de collecteur.

Cependant, la principale difficulté réside dans son pilotage.

7.1.3 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Dans le cas des moteurs à rotor à aimants permanents, l'excitation est assurée par les aimants permanents eux-mêmes. Le champ magnétique ainsi créé induit une vitesse de rotation telle que le moteur tourne en synchronisme avec la fréquence du courant[26].

Les avantages de ce type de moteurs résident dans les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse, ainsi que dans leur bon rendement. Cependant, la commande de ces machines est complexe et il existe des risques de désaimantation, ainsi que des pertes électriques supplémentaires dues à l'augmentation du courant statorique[26].

Pour les applications de traction électrique, les moteurs avec excitation par aimants permanents sont préférés. En effet, cela signifie l'absence de balais, et donc pas d'entretien nécessaire[26].

7.1.4 Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Dans les moteurs à masses polaires du rotor, les masses polaires agissent comme des électroaimants alimentés en courant continu. L'induction magnétique peut ainsi être ajustée en modifiant le courant d'excitation. Ce flux d'excitation est créé par un courant injecté dans les enroulements du rotor. Cette configuration permet de choisir facilement le point de fonctionnement de la machine et offre la possibilité de défluxage en réduisant simplement le courant d'excitation[26].

Il est également possible d'adapter des lois de commande pour optimiser le rendement de cette machine. Cependant, elle présente certains inconvénients :

- Les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir ;
- La densité de courant peut être choisie faible pour réduire les pertes ;
- Les contacts glissants (balais-bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse et entraînent une usure des balais ;
- Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles.

Malgré ces inconvénients, cette machine représente une solution prometteuse pour la traction électrique automobile[26].

7.1.5 Moteur à réluctance variable

La machine synchrone à réluctance variable est structurellement similaire à une machine synchrone à pôles saillants, mais elle est dépourvue d'excitation. Son stator est identique à celui des machines à courant alternatif ordinaires. Le couple électromagnétique est généré exclusivement par le couple de saillance. L'énergie est convertie dans la machine par variation des inductances propres et mutuelles de ses enroulements de phase, résultant de la rotation d'un rotor magnétiquement dissymétrique entre les axes de faible et forte réluctance[26].

Il s'agit d'une machine à réluctance variable, plus précisément d'une machine à réluctance pure polyphasée à stator lisse avec une alimentation sinusoïdale. Étant donné que la machine tourne en synchronisme avec son alimentation et fonctionne par variation de réluctance, elle est désignée comme une "machine synchrone à réluctance" (Synchronous Reluctance Motor)[26].

La machine synchrone à réluctance variable convient aux applications à forte puissance et à haute vitesse, un domaine largement occupé par les machines asynchrones. Cependant, elle offre une alternative compétitive à la machine asynchrone, qui présente des pertes Joule et des pertes fer au rotor en régime permanent[26].

En tant que machine à courant alternatif, la machine synchrone à réluctance variable possède le même type d'enroulements statoriques qu'une machine asynchrone, mais son facteur de puissance est généralement plus faible que celui des autres machines électriques[26]. Pour répondre à un besoin spécifique, l'optimisation de la structure du rotor est cruciale pour augmenter le rapport de saillance (L_d/L_q) et améliorer les performances de la machine, telles que le facteur de puissance et le rendement.

Dans cette configuration, le couple est généré uniquement grâce à l'effet de réluctance. Le rotor est conçu de manière à maximiser le rapport d'induction dans les axes direct et quadrature (L_d/L_q).

Un rapport élevé de saillance entraîne généralement un facteur de puissance plus élevé. Les principaux avantages de cette approche sont [26] :

- La capacité à fonctionner à des vitesses élevées.
- Un rendement relativement élevé par rapport aux machines asynchrones.

Cependant, cette conception présente également des inconvénients :

- La fabrication peut être délicate en raison de la nécessité d'un rapport de saillance élevé.

- Un facteur de puissance potentiellement faible.
- La complexité accrue de l'électronique de commande.
- La nécessité d'un capteur de position pour assurer un fonctionnement précis.

Malgré ces inconvénients, l'optimisation de la structure du rotor dans les machines synchrones peut offrir des performances améliorées dans certaines applications[26].

TABLE 1.1 – Choix de la motorisation en fonction des différents critères(+), avantage; (0) neutre; (-) désavantage[26].

Critères	DC Moteur	AC Asynchrone	AC synchrone à aimants permanents
Rapport poids/puissance	-	0	+
Vitesse de rotation maximale	-	+	+
Endurance et maintenance	-	+	0
Rendement (%)	80 → 85	85 → 90	90 → 95
Taille et poids du système de commande	+	0	0
Contrôlabilité	++	+	+
Nombre de semi-conducteurs pour le contrôle	+	0	0

7.2 Convertisseurs statiques

Suivant l'utilisation de machines à courant continu ou à courant alternatif, les convertisseurs d'énergie devront être différents à savoir :

7.2.1 Les redresseurs (AC/DC)

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont des composants essentiels utilisés pour convertir l'énergie électrique fournie, que ce soit par le réseau de distribution général ou par un alternateur embarqué couplé à un moteur thermique, de courant alternatif en énergie électrique à courant continu. Cette énergie peut ensuite être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité[11].

7.2.2 Les hacheurs (DC/DC)

Un hacheur est un convertisseur continu-continu, qui permet de générer à partir d'une source de tension à courant continu, de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés et ajustables, différents des valeurs d'entrée et adaptés aux besoins spécifiques des divers équipements (moteurs, batteries, etc.)[11]. Dans le contexte des véhicules

électriques, les hacheurs ont deux utilisations fondamentales :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion lorsqu'ils sont de type moteur à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour ajuster la tension de la batterie principale à celle requise par les équipements électroniques auxiliaires utilisés, tels que les capteurs et les régulateurs.

Il est important de noter qu'un branchement direct d'un moteur à courant continu sur une source d'énergie à tension fixe, comme une batterie d'accumulateurs, est problématique pour plusieurs raisons :

- Aucun ajustement du couple moteur ou de la vitesse du moteur ne serait possible.
- Le régime transitoire lors de la mise sous tension directe du moteur serait destructeur tant sur le plan électrique (surintensité) que mécanique (sur couple).

L'utilisation d'un hacheur permet de maintenir le courant moteur à la valeur désirée tout en assurant un réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur, et donc du véhicule en traction, ainsi qu'en freinage électrique[11].

7.2.3 Les onduleurs (DC/AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, un composant essentiel est l'onduleur, nécessaire pour convertir l'énergie électrique à courant continu provenant de la source d'énergie en énergie électrique à courant alternatif. Cet onduleur permet de contrôler le couple des moteurs et de régler la vitesse du véhicule. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer la conversion DC-AC, mais dans le contexte des véhicules routiers et pour des raisons industrielles, une structure courante est l'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels[11].

Cet onduleur est composé de paires d'IGBTs (Transistors Bipolaires à grille isolée) et de diodes montées en antiparallèle, commandées selon une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM en anglais). Ce montage permet de connecter une source de tension, telle qu'une batterie, à un récepteur de type source de courant, comme un moteur asynchrone, un moteur synchrone bobiné, un moteur à aimant permanent ou un moteur à réluctance variable[11].

La méthode de commande par MLI présente deux avantages majeurs :

- Elle déplace les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées, facilitant ainsi le filtrage de cette tension.
- Elle permet de modifier le niveau de base de la tension de sortie, offrant ainsi un contrôle précis sur la tension fournie au moteur.

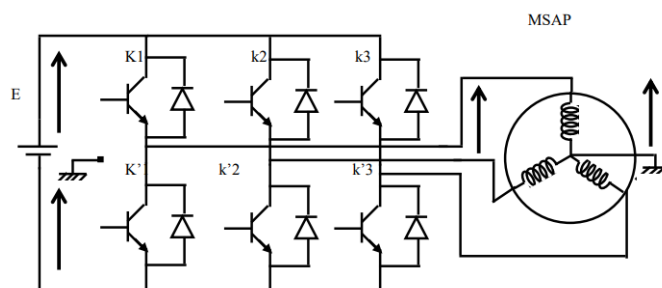


FIGURE 1.11 – Le schéma d'un onduleur triphasé branché au moteur[11].

7.3 Source d'énergie électrique

L'un des défis majeurs des véhicules électriques réside dans leur source d'énergie. Dans cette section, nous présentons brièvement deux voies technologiques potentielles pour l'alimentation embarquée : les batteries, largement utilisées dans tous les véhicules électriques actuels, les supercondensateurs et les piles à combustible, une solution d'avenir largement promue par les spécialistes des véhicules électriques[17].

7.3.1 Les batteries

Parmi les technologies de batteries les plus courantes, on trouve la batterie au plomb et la batterie li-ion. La batterie au plomb est économique, nécessite peu d'entretien et aussi robuste. Cependant, elle présente des performances limitées, une densité énergétique inférieure et une durée de vie d'environ 3 à 5 ans. En revanche, la batterie li-ion offre une densité énergétique nettement plus élevée, une durée de vie de 8 à 15 ans et un poids plus léger, ce qui la rend idéale pour les applications mobiles. De plus, bien qu'elles soient plus coûteuses à l'achat, les batteries li-ion sont plus efficaces et nécessitent moins de maintenance. À titre d'exemple, le tableau ci-dessous présente quelques chiffres permettant de comparer différentes technologies de batteries[18][17] :

TABLE 1.2 – Technologies des batteries[18].

	Plomb Acide Pb-PbO ₂	Nickel Cad- mium NiCd	Nickel Métal Hydruure NiMH	Sodium Soufre NaS	Li-ion
Energie massique (Wh/kg)	40	60	80	100	180
Puissance massique (W/kg)	90	200	200	100	270
Durée de vie Nombre de cycles	100	2000	1500	800	1200
Energie volu- mique (Wh/l)	90	120	130	150	300
Poids pour 20 kwh(kg)	600	300	250	200	130

7.3.2 Les Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage d'énergie électrique dont les caractéristiques se situent entre celles des condensateurs électriques et des accumulateurs électrochimiques. Ils se distinguent par leur grande cyclabilité et leur densité de puissance élevée. Tout comme les batteries ou les piles à combustible, ils sont composés de deux électrodes et d'un électrolyte ionique. Cependant, contrairement aux batteries, les supercondensateurs n'impliquent pas de réactions électrochimiques aux électrodes, mais plutôt un stockage de charges aux interfaces électrode/électrolyte ou un intercalage d'ions dans la structure de l'électrode sans qu'il y ait de réaction chimique. En général, la charge dans l'électrode présente un excès ou un défaut d'électrons[21].

Une supercapacité est un type spécifique de condensateur, utilisant généralement un électrolyte organique (liquide ou solide) et doté de matériaux tels que le charbon actif (pour les supercondensateurs) ou des oxydes métalliques (pour les ultracapacités). D'un point de vue physique, il s'agit toujours d'un condensateur gris, stockant relativement peu d'énergie (entre 3 et 8 Wh/kg), mais capable de délivrer ou d'absorber une puissance massique très élevée, de l'ordre de 10 kW/kg[21].

L'association de batteries et de supercondensateurs constitue une solution intéressante qui offre plusieurs avantages :

- Augmentation de la puissance maximale disponible.
- Récupération efficace de l'énergie de freinage, avec des rendements très élevés.
- Régulation du courant de décharge, ce qui permet d'éliminer les pics de courant.
- Augmentation de la durée de vie de la batterie.
- Augmentation de l'autonomie du véhicule.

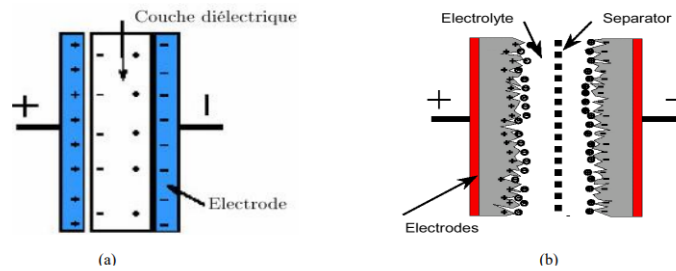


FIGURE 1.12 – (a) Condensateur (b) Supercondensateur[21].

7.3.3 Pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible tel que l'hydrogène ou le méthanol en énergie électrique, grâce à un processus électrochimique contrôlé. Son principe de fonctionnement repose sur une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, entraînant simultanément la production d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale bien connue[19].

Chaque cellule élémentaire d'une pile à combustible est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. À l'anode, le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol) est introduit, tandis que la cathode est alimentée en oxygène (ou simplement en air, enrichi ou non en oxygène)[19].

L'utilisation d'une pile à combustible représente une alternative importante pour l'alimentation des véhicules électriques, offrant la possibilité d'atteindre une autonomie supérieure à 400 km[19].

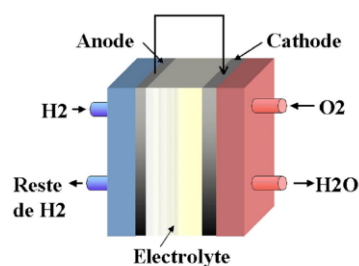


FIGURE 1.13 – Schéma d'une PàC[19].

8 Conclusion

Pour promouvoir une mobilité plus propre et respectueuse de l'environnement dans les zones urbaines densément peuplées du monde, l'adoption de véhicules électriques doit être envisagée comme l'une des solutions. Malgré les avancées de la recherche dans le domaine du développement des véhicules électriques, notamment en ce qui concerne les sources

d'énergie (batteries), la gestion de l'énergie et le contrôle du système de propulsion électrique, ces véhicules sont encore confrontés à des défis, principalement liés à l'autonomie de la batterie, à la gestion de l'énergie et aux systèmes de propulsion électrique. Une brève présentation du contexte énergétique et environnemental mondial associé à l'utilisation des énergies fossiles dans les transports est proposée. Un survol de l'histoire du véhicule électrique est également offert. Ensuite, une vue d'ensemble des systèmes embarqués à bord du véhicule électrique, ainsi que des principales configurations, ont été présentée. Le prochain chapitre sera dédié à la modélisation des différents sous-systèmes composant le véhicule électrique.

Chapitre 2

Modélisation des éléments de la chaîne de traction

1 Introduction

La modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique repose généralement sur des équations très complexes. En effet, les différents types de composants utilisés dans la chaîne de traction peuvent rendre son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, le choix de certains composants et l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permettent de contourner cette difficulté. Ainsi, la chaîne de traction étudiée dans ce PFE est basée sur l'utilisation d'un MCC, qui est simple à modéliser et à commander. Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles des différents composants de la chaîne de traction. Nous commencerons par le modèle du MCC et son convertisseur statique. Ensuite, nous allons présenter et identifier et de présenter les différentes forces de résistance à l'avancement du véhicule, qui interviennent dans le modèle dynamique du véhicule. En fin, nous allons présenter les sources d'énergies utilisées et leurs modèles à savoir une batterie, un supercondensateur et une pile à combustible.

2 Modélisation du moteur à courant continu

Le MCC peut être modélisé par un système d'équations électrique et mécanique représentant un système physique dont l'entrée est la tension d'alimentation de l'induit et sa sortie est la vitesse de rotation mécanique.

2.1 Équations électriques

En se référant au schéma électrique du MCC, l'induit est modélisé par une résistance en série avec l'inductance et la force contre-électromotrice. Le modèle électrique du MCC est le suivant :

$$U(t) = RI(t) + L \left(\frac{dI}{dt} \right) + E(t) \quad (2.1)$$

U : Tension d'alimentation de l'induit (V).

E : Force électromotrice (V).

R : Résistance de bobinage de l'induit (Ohm).

I : Courant de l'induit (A).

L : inductance de l'induit en henry (H).

2.2 Équations électromécaniques du MCC

La relation de proportionnalité entre la f.é.m et la vitesse de l'induit est la suivante :

$$E = K' \cdot \Phi \cdot \Omega = K \cdot \Omega \quad (2.2)$$

E : la f.e.m (V).

Ω : Vitesse de rotation de l'induit (rad/s).

K : constante électrique du moteur.

Le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant d'induit :

$$Cem = K \cdot I \quad (2.3)$$

2.3 Équations mécaniques

L'équation dynamique de la partie mécanique est donnée sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Cem - Cr - f \cdot \Omega \quad (2.4)$$

J : Moment d'inertie du moteur à courant continu (Kg.m²).

Cem : Le couple électromagnétique du moteur (Nm).

Cr : Couple résistant (Nm).

f : Coefficient des frottements visqueux.

Ω : Vitesse de rotation de l'induit (rad/s).

2.4 Transformée de la place appliquée aux équations du MCC

La transformée de Laplace appliquée à l'équation électrique donne la fonction de transfert suivante :

$$I(p) = \frac{U(p) - K \cdot \Omega(p)}{L \cdot p + R} \quad (2.5)$$

La transformée de Laplace appliquée à l'équation mécanique donne la fonction de transfert suivante :

$$\Omega(p) = \frac{K \cdot I(p) - Cr}{J \cdot p + f} \quad (2.6)$$

3 Modélisation du convertisseur statique

Le convertisseur statique utilisé est le hacheur buck, un convertisseur DC-DC qui abaisse la tension d'entrée (U) en une tension de sortie (E) proportionnelle au rapport cyclique α selon l'équation suivante [9] :

$$U = \alpha \cdot E \quad (2.7)$$

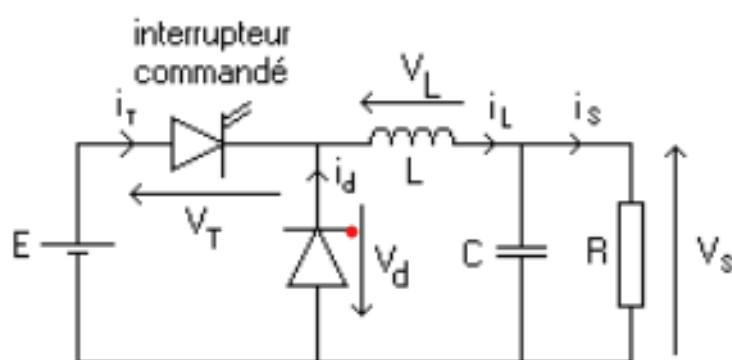


FIGURE 2.1 – Schéma de base du hacheur Buck[9].

4 Modèle dynamique du véhicule

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes forces résistantes à l'avancement du véhicule afin de déterminer la force de traction nécessaire. Ainsi, nous nous basons sur l'équation fondamentale décrivant la dynamique d'un véhicule routier, qui est donnée sous la forme suivante :

$$m \cdot a = F_t - [F_{air} + F_r + F_p] \quad (2.8)$$

ou F_{air} est la force aérodynamique, F_r est la force de résistance au roulement, F_p la force de la pente lorsque le véhicule roule sur des routes non horizontales, m la masse du véhicule, a l'accélération du véhicule, et F_t la force de traction générée par le moteur principal. La figure 2.2 présente une représentation schématique de cette relation[13].

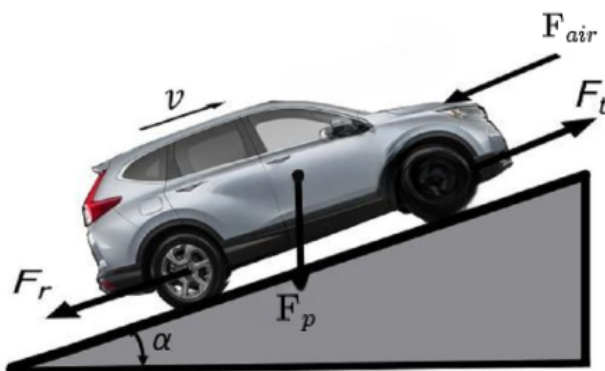


FIGURE 2.2 – Représentation du véhicule et les forces agissantes sur lui[13].

4.1 Force aérodynamique

La force aérodynamique F_{air} est la force de résistance subie par le véhicule en mouvement dans l'air, calculée par la formule [13] :

$$F_{air} = 0.5 \cdot \rho \cdot sc \cdot (Vmax)^2 \quad (2.9)$$

Avec

$Vmax$: La vitesse du véhicule (m/s).

ρ : La densité de l'air (kg/m^3).

sc : La surface frontale du véhicule (m^2).

4.2 Force de résistance au roulement

La force de résistance au roulement est la force qui s'oppose au mouvement d'un véhicule sur une surface. Cette force est détaillée ci-dessous[13].

$$F_r = m \cdot g \cdot [(12.5e^{-3}) + 2.5e^{-6} \cdot Vmax^2] \quad (2.10)$$

Avec

$Vmax$: La vitesse du véhicule (km/h).

m : La masse du véhicule (kg).

g : Accélération due à la gravité ($9.81 m/s^2$).

4.3 Force de la pente

La force due à la pente lors de la conduite sur une route en rampe influe considérablement sur le comportement du véhicule. Dans ce texte, cette force sera modélisée par la

relation[13].

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.11)$$

Avec

α : Angle d'inclinaison de la pente en radians.

4.4 Force d'accélération

La force due à l'accélération F_a assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Cette force est obtenue par le produit entre la masse du véhicule et l'accélération imposée par le conducteur [13].

$$F_a = m \frac{d}{dt} v(t) = m \cdot a \quad (2.12)$$

Avec

a : L'accélération du véhicule (m/s²).

5 Modélisation des sources d'énergie

5.1 Modèle de la batterie Li-Ion

La batterie au Li-Ion est décrite par deux éléments principaux : la tension à vide E_{batt} , et la résistance interne R_{batt} . Ces caractéristiques dépendent de plusieurs paramètres, tels que la capacité de la batterie, sa composition chimique, les conditions de température, le taux de décharge, et le nombre de cycles de charge et de décharge. Le courant I_{batt} utilisé peut également influencer la performance globale de la batterie[14][10].

$$V_{batt} = E_{batt} \cdot n_{batt} + R_{batt} \cdot n_{batt} \cdot I_{batt} \quad (2.13)$$

avec n_{batt} est le nombre des cellules.

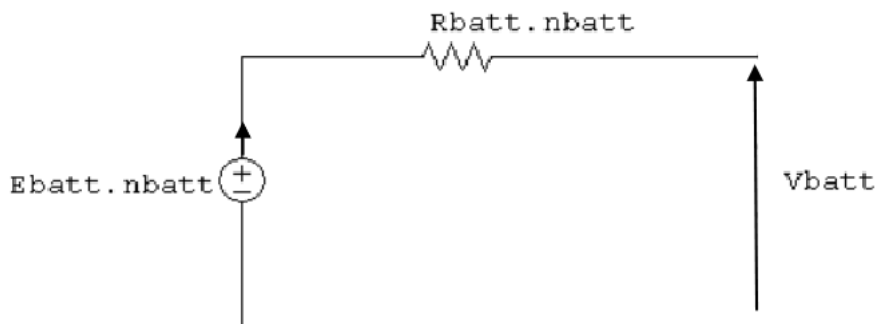


FIGURE 2.3 – Schéma équivalent d'une batterie[14][10].

5.2 Modèle de supercondensateur

Les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement de supercondensateur et celui de condensateur électrolytique. Pour cela un SC est caractérisé par une résistance série R_{sc} et une capacité de stockage C_{sc} [5].

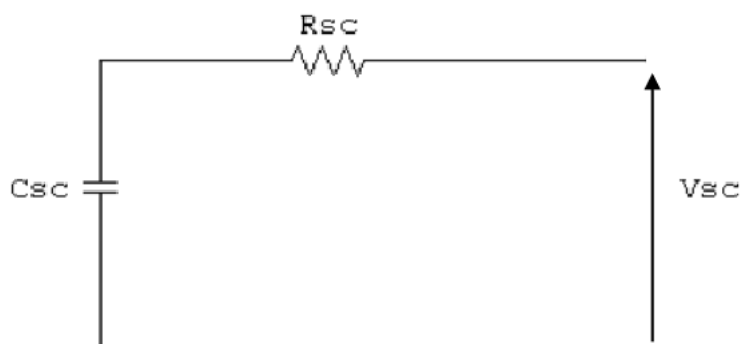


FIGURE 2.4 – Schéma équivalent du supercondensateur[14][10].

La tension aux bornes d'un supercondensateur V_{sc} est donnée par :

$$V_{sc} = V_c + R_{sc} \cdot I_{sc} \quad (2.14)$$

La puissance P_{sc} est définie par :

$$P_{sc} = V_{sc} \cdot I_{sc} \quad (2.15)$$

Les Conventions appliquées sont :

$P_{sc} > 0$ En traction (décharge du supercondensateur).

$P_{sc} < 0$ En freinage (charge du supercondensateur).

5.2.1 Tension et énergie à vide

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide V_c est calculée de la manière suivante[5] :

$$V_c = V_c(0) - \frac{1}{C} \int_0^t I_{sc} \cdot dt \quad (2.16)$$

L'énergie contenue dans le supercondensateur E_{sc} est en fonction de sa tension à vide V_0 et sa capacité C_{sc} . De ce fait, l'énergie maximale E_{scmax} est obtenue pour la tension à vide maximale V_{0max}

$$E_{sc}(V_c) = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot V_0^2 \quad (2.17)$$

5.2.2 Tension et énergie en charge

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le supercondensateur et l'énergie maximale admissible [5] :

$$SOC = \frac{E_{sc}(t)}{E_{scmax}} \quad (2.18)$$

5.2.3 Tension et capacité du Pack de condensateurs

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs supercondensateurs est utilisé .

Lorsque N_{sc} supercondensateurs sont connectés en série, la tension du pack U_{sc} et la capacité équivalente C_{sc}^{eq} sont données [5].

$$U_{sc} = V_{sc} \cdot N_{sc} \quad (2.19)$$

$$C_{sc}^{eq} = \frac{C_{sc}}{N_{sc}} \quad (2.20)$$

5.3 Modèle d'une pile à combustible

Le modèle de la pile à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est schématisé par la figure 2.5 :

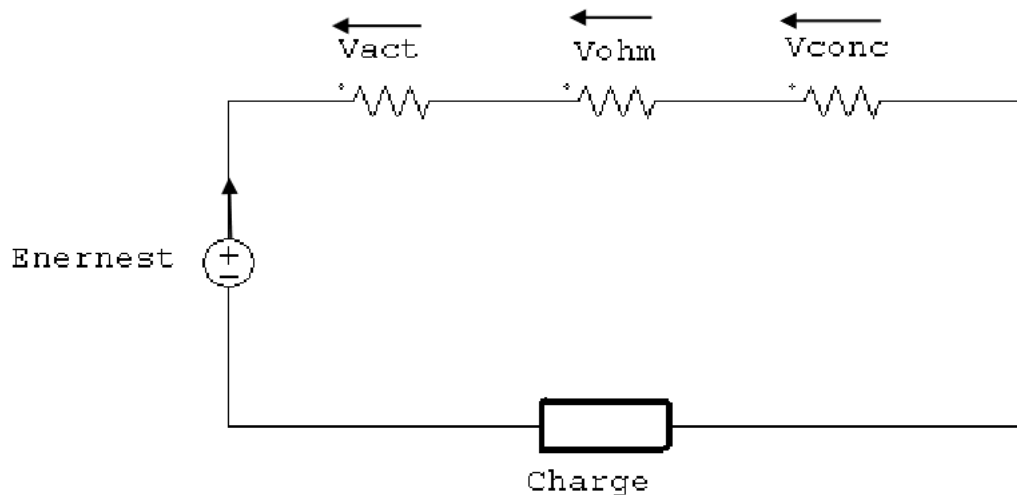


FIGURE 2.5 – Schéma équivalent d'une pile à combustible[14][10].

La tension aux bornes d'une PàC est donnée par l'équation suivante :

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.21)$$

Avec :

E_{Nernst} : La tension à vide.

V_{act} : Chute de tension d'activation.

V_{ohm} : Chute de tension ohmique.

V_{conc} : Chute de tension par concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2}^*)] \quad (2.22)$$

Avec :

T : Température opératoire absolue de la pile (K);

$P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm);

$P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

5.3.1 Chute de tension d'activation

Les Chutes de tension d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques.

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée par l'équation suivante [7] [5] :

$$V_{act} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \cdot T + \epsilon_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}^*) + \epsilon_4 \cdot T \cdot \ln(I_{PAC}) \quad (2.23)$$

Avec :

I_{PAC} : Courant de fonctionnement de la pile ;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$: sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de pile à combustible ;

5.3.2 Chute de tension ohmique

Le chute de tension ohmique est exprimée par l'équation suivante [5] :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \left[1 + 0.03 \frac{I_{PAC}}{A} + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{H20}/SO_3^- - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \cdot \exp \left[4.18 \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right] \right]} \cdot 1 + A \cdot R_c \right] \quad (2.24)$$

Le terme $\frac{181.6}{(\lambda_{H20}/SO_3^- - 0.0634)}$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega.cm$).

λ_{H20}/SO_3^- : Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 ;

A : Est la surface active de la pile (cm^2)

5.3.3 Les chutes de tension par concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la réaction suivante [7] [5] :

$$V_{conc} = -B\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (2.25)$$

Avec :

B : est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement ;

J : est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm²)

J_{max} : est la densité de courant maximale.

Par conséquent, la tension (Es) de (n) piles unitaires reliées en série formant un assemblage est donnée par :

$$E_s = n \cdot E_{PAC} \quad (2.26)$$

On remplace les expressions des pertes dans l'équation (2.21) et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible :

$$U_{pac} = 0.2817 - 0.851^{-3}(T - 298.15) + 4.3081 \left[\ln\left(\frac{3}{4}P_{anode}\right) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1}{2}P_{cath}\right) \right] +$$

$$\left[\begin{aligned} & \left[2.86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(A) + 4.3 \cdot 10^{-5} \cdot \ln\left(\frac{0.76 \cdot P_{anode}}{1.091 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right) \right] T + \\ & \left[7.6 \cdot 10^{-5} \cdot \ln\left(\frac{0.5 \cdot P_{cath}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{498}{T}\right)}\right) - 1.93 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot \ln(I_{PAC}) \right] - \end{aligned} \right]$$

$$I_{PAC} \left[\frac{181.6 \left[1 + 0.03 \frac{I_{PAC}}{A} + 0.062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5} \right]}{A \left[\lambda_{H2O}/SO_3^- - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) \cdot \exp \left[4.18 \left(\frac{T - 303}{T}\right) \right] \right]} \right] \cdot 1 + \cdot R_c \quad (2.27)$$

6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les modèles des différents composants de la chaîne de traction, en commençant par le modèle du moteur à courant continu et son convertisseur statique. Nous avons ensuite identifié les différentes forces de résistance à l'avancement du véhicule, qui interviennent dans le modèle dynamique. En fin, nous avons présenté les modèles des sources d'énergie utilisées.

Chapitre 3

Simulation de la chaîne de traction du véhicule électrique hybride

1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats de simulation de la chaîne de traction afin de valider les modèles développés dans le deuxième chapitre. Nous allons commencer par la simulation du modèle du moteur électrique et de son convertisseur statique. Ensuite, nous présenterons les boucles de régulation du courant et de la vitesse. Après cela, le modèle dynamique du véhicule sera validé, puis connecté à celui du moteur de traction pour former le modèle complet de la chaîne de traction.

Enfin, nous présenterons les résultats de simulation des sources d'alimentation avec leurs techniques de gestion.

Une autre partie sera consacrée à la présentation d'un exemple de modèle de véhicule électrique disponible dans la bibliothèque de MATLAB.

2 Résultats de simulation de la chaîne de traction

2.1 Simulation du modèle du MCC

La simulation sous MATLAB/Simulink constitue un moyen efficace de validation des modèles des systèmes facilitant ainsi la compréhension et la reproduction de leur fonctionnement.

Le schéma bloc du modèle du moteur électrique se compose de deux parties :

2.1.1 Partie électrique

La fonction de transfert de cette partie est exprimée par :

$$I(p) = \frac{U(p) - K \cdot \Omega(p)}{L \cdot p + R} \quad (3.1)$$

2.1.2 Partie mécanique

La fonction de transfert de cette partie est exprimée par :

$$\Omega(p) = \frac{K \cdot I(p) - Cr}{J \cdot p + f} \quad (3.2)$$

Donc le schéma bloc représentant le MCC est représenté par la figure 3.1 :

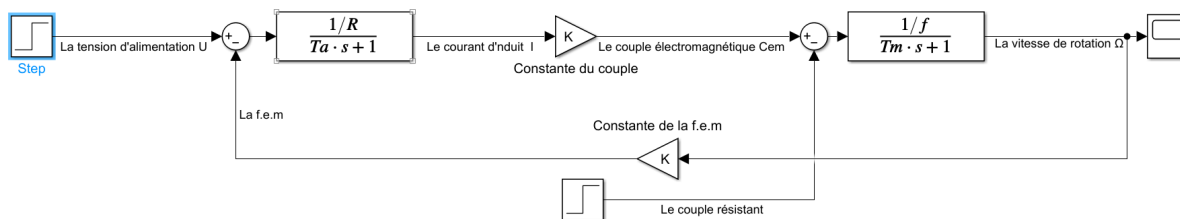


FIGURE 3.1 – Schéma bloc du modèle du MCC sous Matlab/Simulink.

avec : $T_a = L/R$, et $T_m = J/f$ qui sont des constantes de temps en seconde
 La simulation de ce bloc nous a permis d’obtenir les résultats suivants :

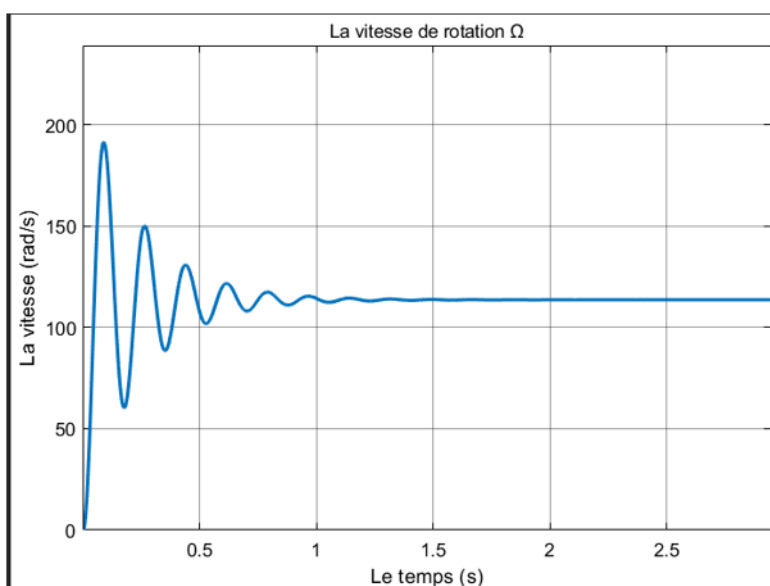


FIGURE 3.2 – Allure de la vitesse de rotation du moteur Ω.

Interprétation des résultats :

La vitesse de rotation commence de zéro, augmente puis passe par des oscillations jusqu’à atteindre la valeur 120 rad/s, et se stabilise. Cette valeur représente la vitesse en régime permanent.

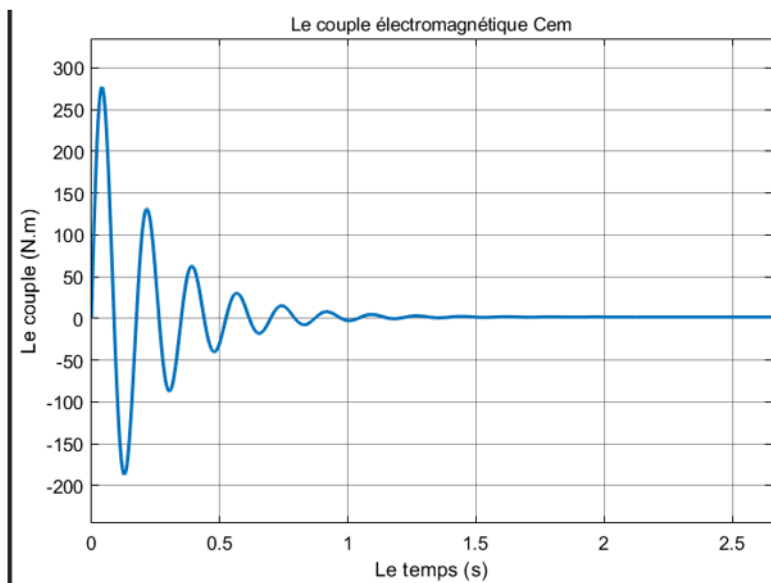


FIGURE 3.3 – : Allure de couple électromagnétique Cem.

Interprétation des résultats :

Le couple électromagnétique 'Cem' atteint une valeur de 270 N.m et après il diminue et passe par des oscillations jusqu'à atteindre une valeur presque nulle et se stabilise.

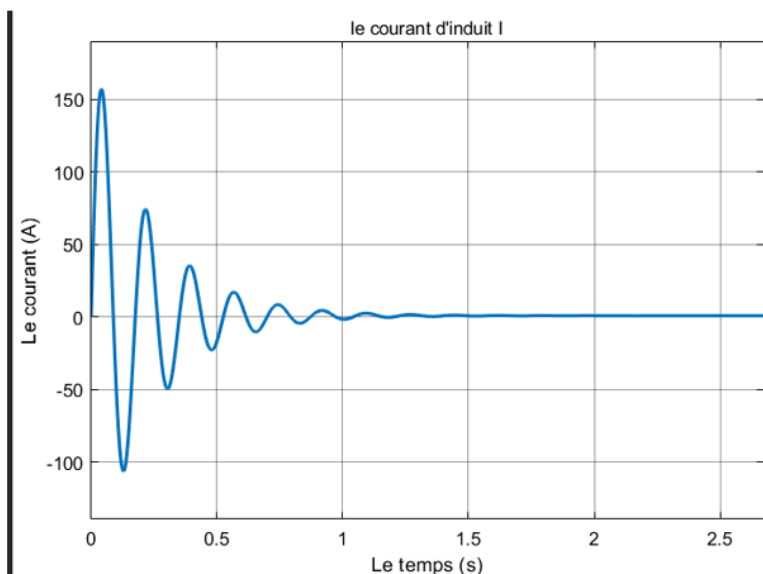


FIGURE 3.4 – : Allure de courant d'induit I.

Interprétation des résultats :

Le courant d'induit aura la même réponse que celle du couple parce que nous avons la loi $Cem = K.I$ (le couple dépend du courant).

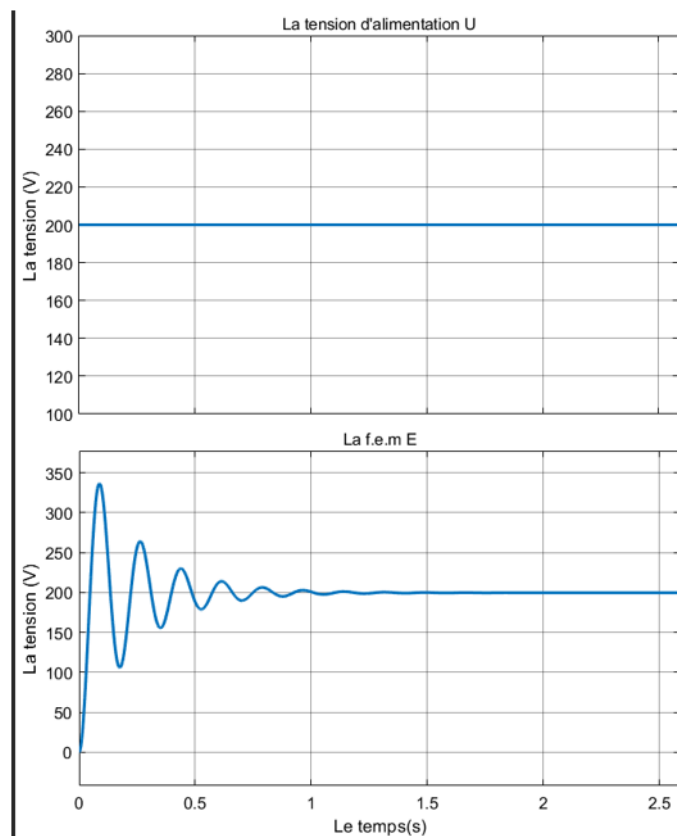


FIGURE 3.5 – Allure de la tension d'alimentation U et la f.e.m .

Interprétation des résultats :

La tension d'alimentation du moteur est constante, par contre la force électromotrice aura la même réponse que celle de la vitesse de rotation parce que nous avons la loi $E = K \cdot \Omega$ (la force électromotrice dépend de la vitesse de rotation). jusqu'à atteindre presque la valeur 200 V, et se stabilise.

2.2 Schéma bloc de convertisseur

Le hacheur est utilisé pour obtenir une tension d'alimentation adaptée à notre moteur.

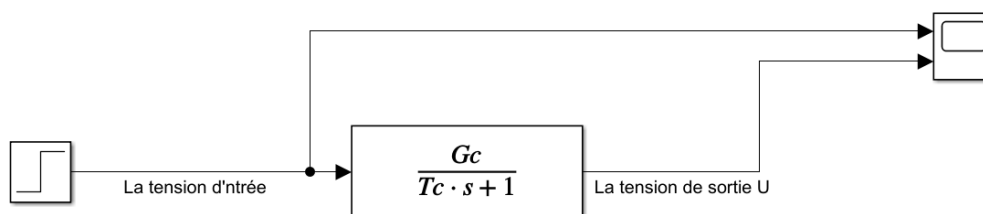


FIGURE 3.6 – Schéma bloc du modèle de convertisseur sous Matlab/Simulink.

avec :

$$T_c = 5 \times 10^{-5} \text{ (s)};$$

$$G_c = \frac{\text{tension nominale}}{\text{signal de commande}} = \frac{200}{10};$$

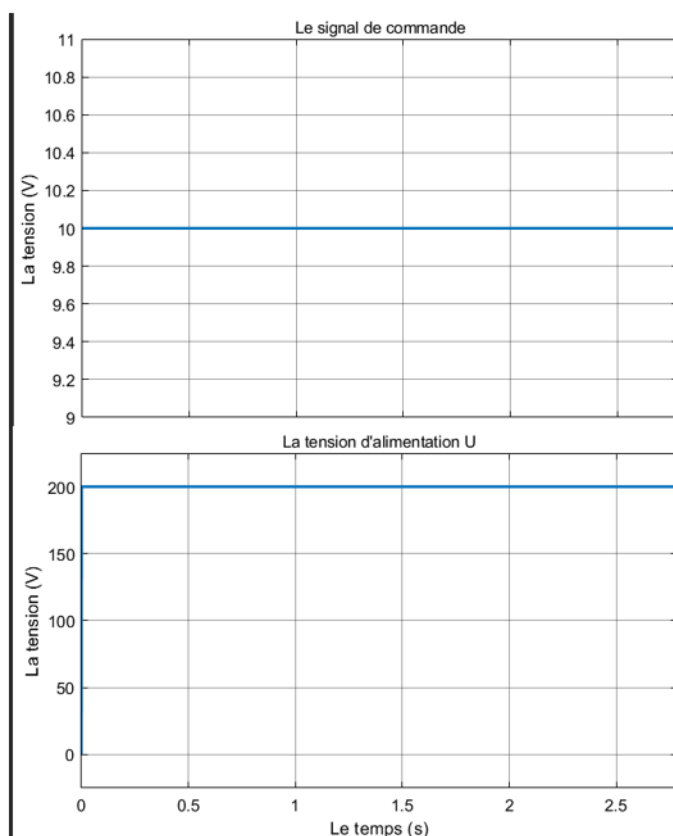


FIGURE 3.7 – Allure de signal de commande et la tension d'alimentation.

Interprétation des résultats :

On remarque que le signal de commande du hacheur est vingt fois inférieur à la tension d'alimentation parce que on a fixé le gain du hacheur à $G_c=20$. Cette dernière alimente le moteur, et comme c'est la même tension d'alimentation, les résultats de la simulation du moteur que nous avons obtenus n'ont pas changé.

2.3 Boucles de régulation

La régulation de la vitesse du moteur est basée sur deux boucles de régulation en cascade, une boucle de régulation du courant d'induit et une boucle de la vitesse de rotation du moteur. L'ajustement des paramètres du régulateur permet d'assurer la stabilité et l'efficacité de la chaîne de traction.

2.3.1 Boucle du courant

Dans cette partie, nous présentons la boucle du courant et les paramètres du régulateur, puis nous analysons les résultats obtenus.

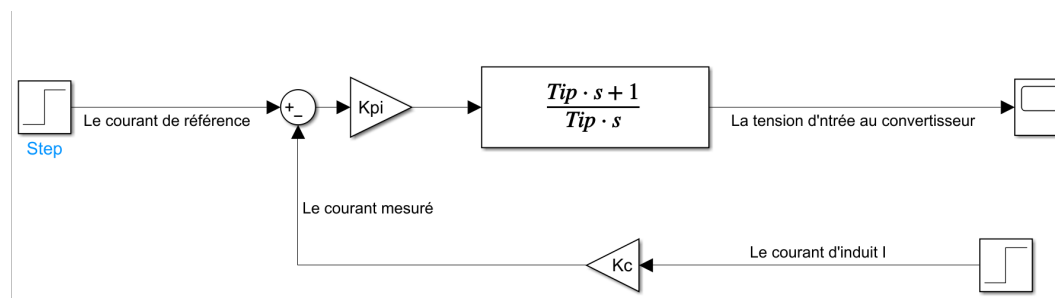


FIGURE 3.8 – Schéma bloc de la boucle du courant.

Avec :

$$T_{ip} = T_a (s);$$

$$K_c = 10 / I_{max};$$

$$K_{pi} = (T_a \cdot R) / (2 \cdot T_c \cdot G_c \cdot K_c);$$

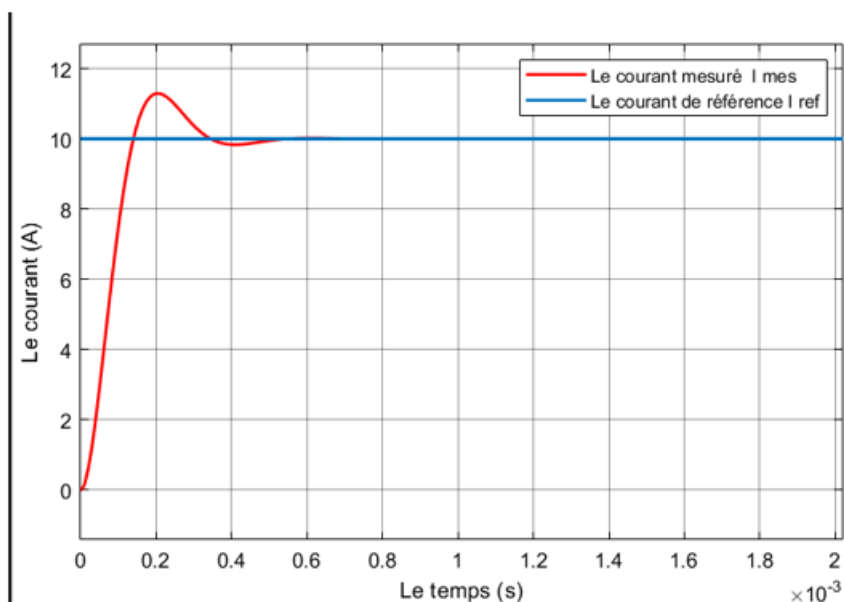


FIGURE 3.9 – : Allure du courant de référence et du courant mesuré.

Interprétation des résultats :

Le courant mesuré atteint une valeur de 11 A et après il diminue et suit sa référence jusqu'à attendre une valeur de 10 A et se stabilise. Le courant d'induit aura la même réponse puisque le courant mesuré dépend de lui.

2.3.2 Boucle de vitesse

Dans cette partie, nous exposons d'abord la boucle de vitesse ainsi que les valeurs de ses paramètres, puis nous procédons à l'analyse des résultats obtenus.

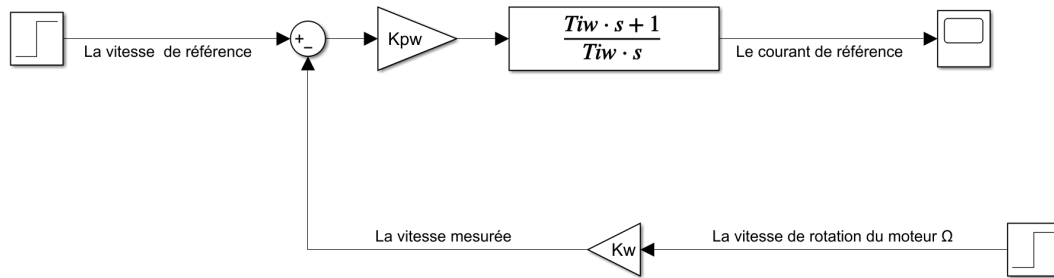


FIGURE 3.10 – Schéma bloc de la boucle de vitesse.

Avec :

$$Ti\omega = T_m (s);$$

$$K_w = 10 / \Omega_{max};$$

$$K_{pw} = (T_m * f * K_c) / (4 * T_c * K * K_w);$$

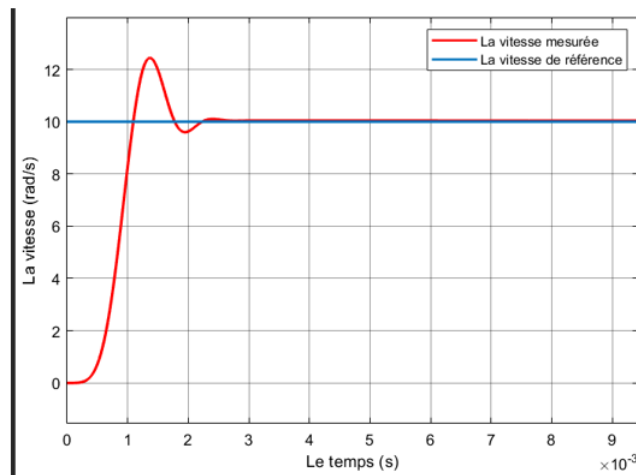


FIGURE 3.11 – Allure de la vitesse de référence et la vitesse mesurée.

Interprétation des résultats :

La vitesse mesurée atteint une valeur de 12 rad/s et après il diminue et suit sa référence en 2.4 ms jusqu'à attendre une valeur de 10 rad/s et se stabilise. Cette valeur représente la vitesse en régime permanent. La vitesse de rotation aura la même réponse, car la vitesse mesurée dépend de la vitesse de rotation.

2.4 Modèle dynamique du véhicule

Un modèle dynamique du véhicule est une représentation mathématique qui décrit le comportement et les interactions d'un véhicule en mouvement. Notre modèle prend en compte divers facteurs, tels que la force aérodynamique, la force de résistance au roulement, la force motrice, ainsi que la force d'accélération.

L'entrée de notre modèle dynamique est la vitesse de rotation du moteur en rad/s, qui sera multipliée par le rapport de réduction pour obtenir la vitesse des roues. Ensuite, cette vitesse sera multipliée par le rayon des roues afin d'obtenir la vitesse du véhicule en m/s.

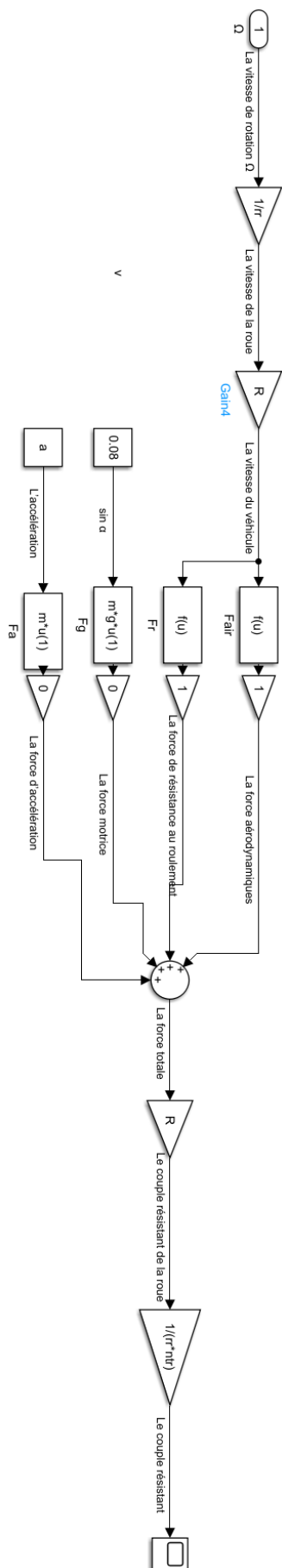


FIGURE 3.12 – Schéma bloc du modèle dynamique du véhicule.

La sortie de notre modèle dynamique est le couple résistant, qui sera injecté dans notre chaîne de traction. Pour obtenir ce couple résistant, nous multiplions la force totale obtenue par le rayon des roues, puis nous multiplions le résultat par le rapport de réduction.

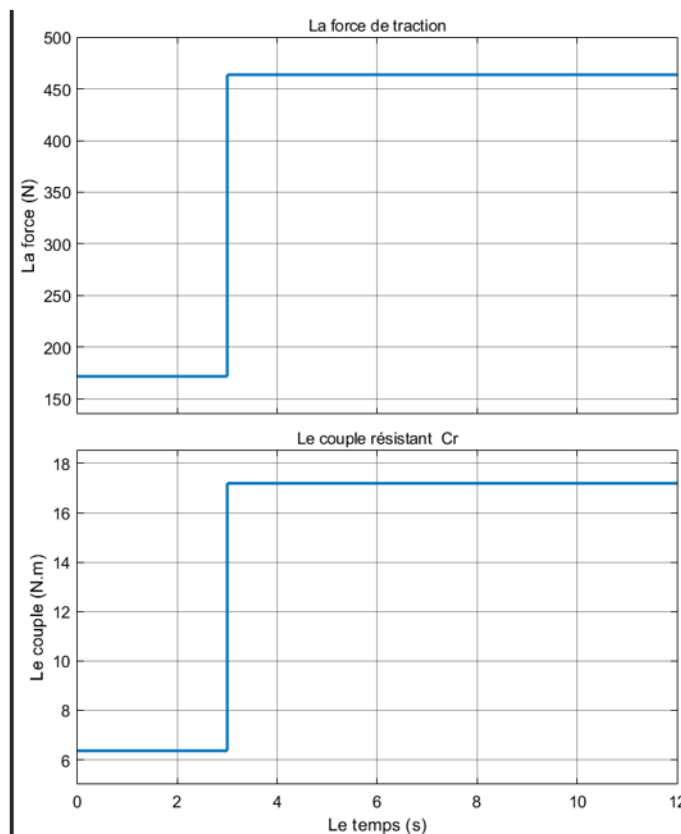


FIGURE 3.13 – Allure de la force de traction et du couple résistant C_r .

Interprétation des résultats :

La force de traction commence par une valeur constante de 170 N, et le couple résistant débute également à 6,5 Nm. Au moment où une vitesse de rotation de 500 rad/s est appliquée, on constate que la force de traction augmente jusqu'à 460 N, et le couple réagit de la même manière, atteignant 17 Nm. Ensuite, les deux se stabilisent, ce qui valide notre modèle dynamique.

3 Résultats de simulation des sources d'alimentation

Les sources d'alimentation des véhicules électriques jouent un rôle crucial dans leur performance, leur efficacité et leur durabilité. Pour cela, nous avons choisi de simuler deux sources d'alimentation : la batterie dont le schéma bloc est représenté sur la figure 3.14 et la pile à combustible représenté sur la figure 3.16.

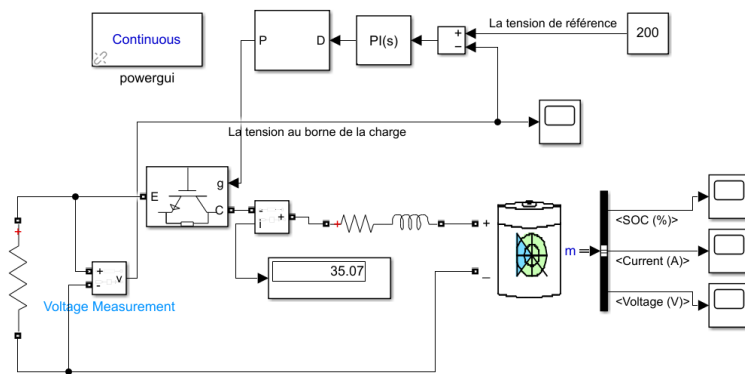


FIGURE 3.14 – Schéma bloc du modèle de la batterie

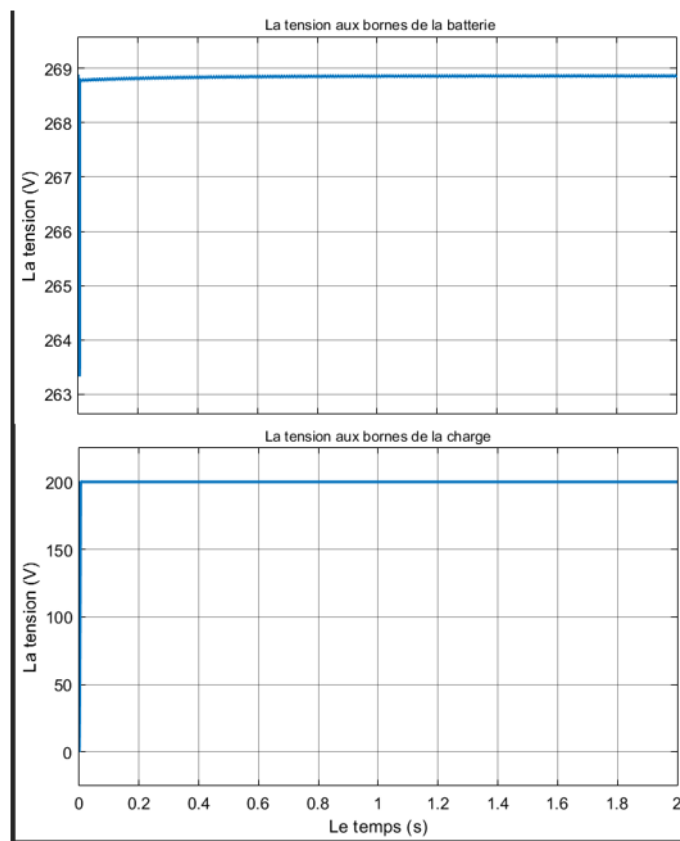


FIGURE 3.15 – Résultats de simulation aux bornes de la batterie et la charge.

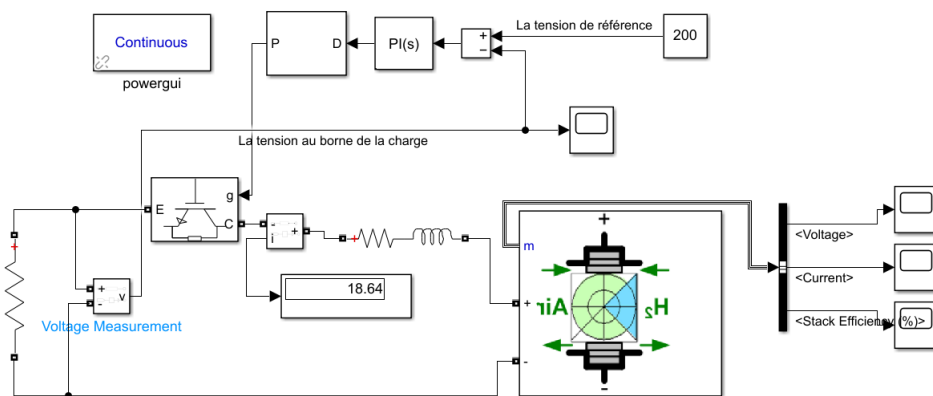


FIGURE 3.16 – Schéma bloc du modèle de la pile à combustible.

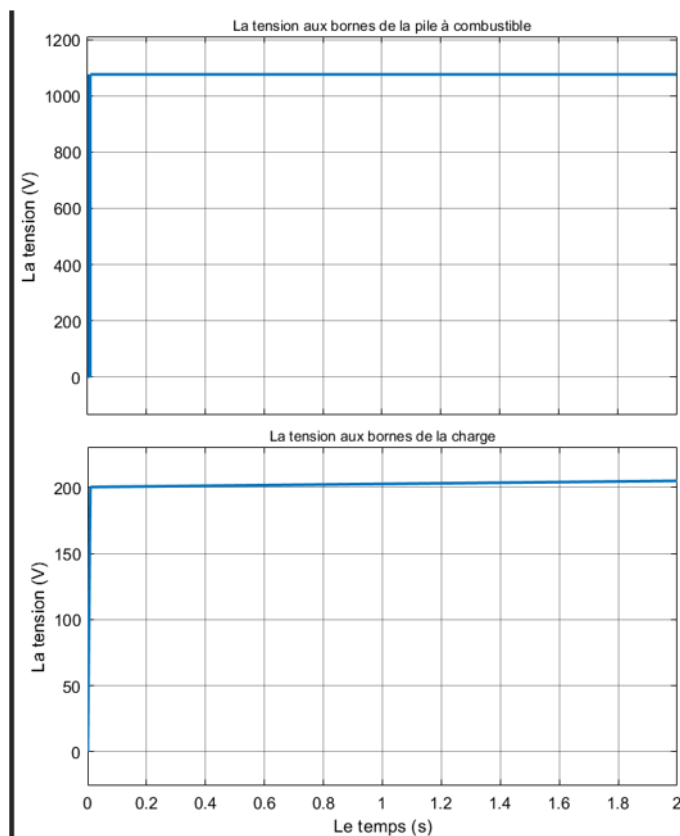


FIGURE 3.17 – Résultats de simulation aux bornes de la pile à combustible et la charge.

La gestion efficace des sources d'alimentation dans les véhicules électriques est cruciale pour optimiser la performance, la durabilité et l'efficacité énergétique. Dans notre cas, nous avons choisi deux méthodes : le fonctionnement à puissances égales et le fonctionnement basé sur le principe de la séparation fréquentielle.

3.1 Deux sources d'alimentation fonctionnant à puissances égales

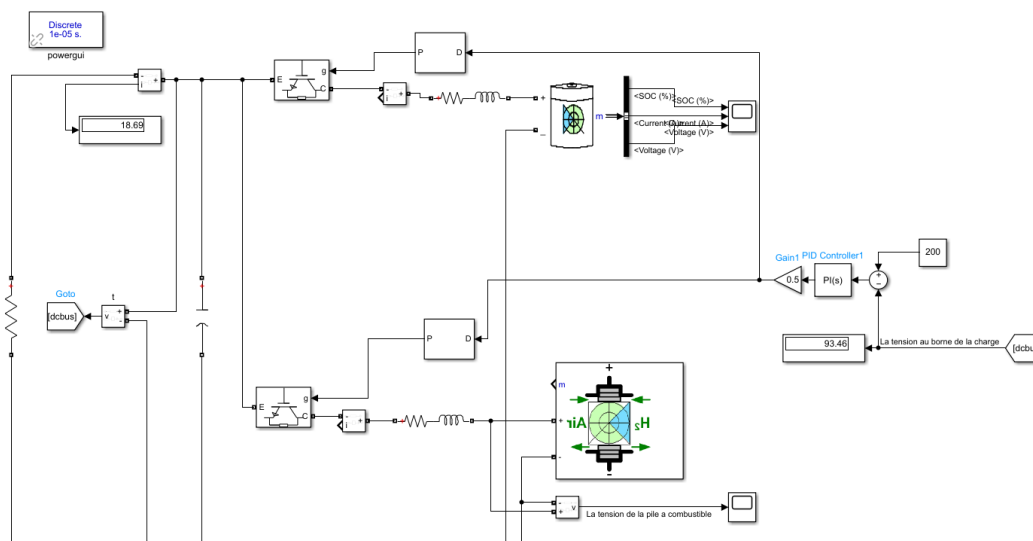


FIGURE 3.18 – Schéma bloc des deux sources fonctionnant à puissances égales.

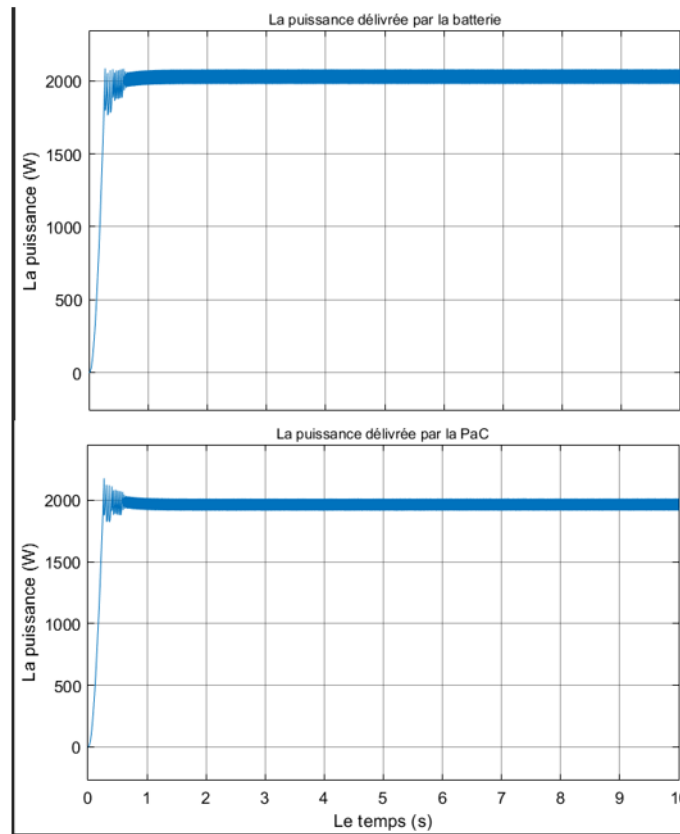


FIGURE 3.19 – Résultats de simulation des deux sources fonctionnant à puissances égales.

Interprétation des résultats :

La puissance délivrée par la batterie et la puissance délivrée par la pile à combustible sont égales, ce qui signifie que le fonctionnement à puissance égale a bien été réalisé.

3.2 Deux sources d'alimentation fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle

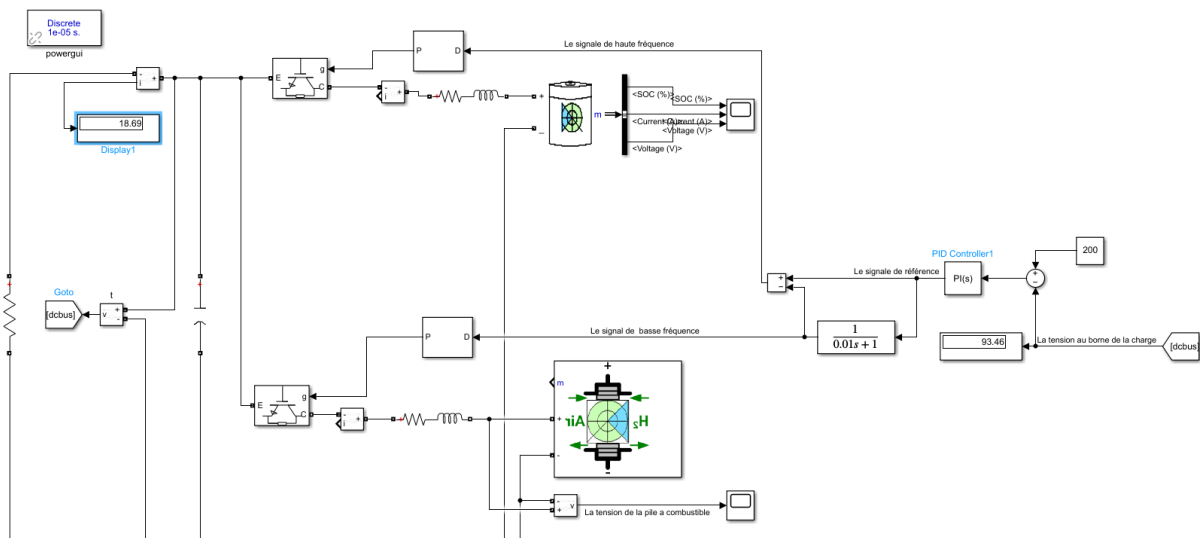


FIGURE 3.20 – Schéma bloc des deux sources fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle.

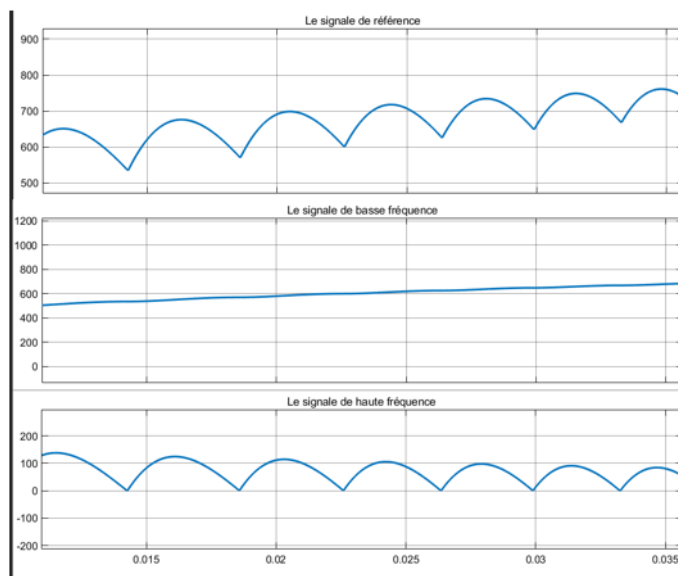


FIGURE 3.21 – Résultats de la séparation fréquentielle.

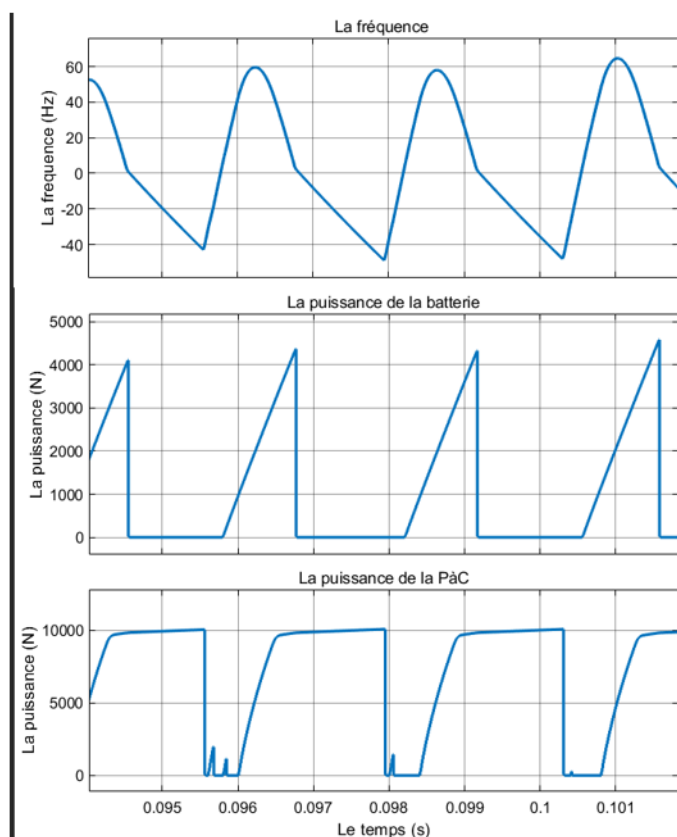


FIGURE 3.22 – Résultats de simulation des deux sources fonctionnant avec la technique de séparation fréquentielle.

Interprétation des résultats :

À haute fréquence, on constate que la batterie délivre une certaine puissance tandis que la puissance de la pile à combustible est nulle. Ensuite, lorsque la fréquence diminue, c'est la pile à combustible qui prend le relais.

4 Modèle complet de la chaîne de traction du véhicule

Le rassemblement des blocs présentés dans ce chapitre nous a permis d'obtenir notre chaîne de traction complète, composée de cinq blocs essentiels : le moteur à courant continu, le convertisseur, le régulateur, le modèle dynamique du véhicule et la source d'énergie.

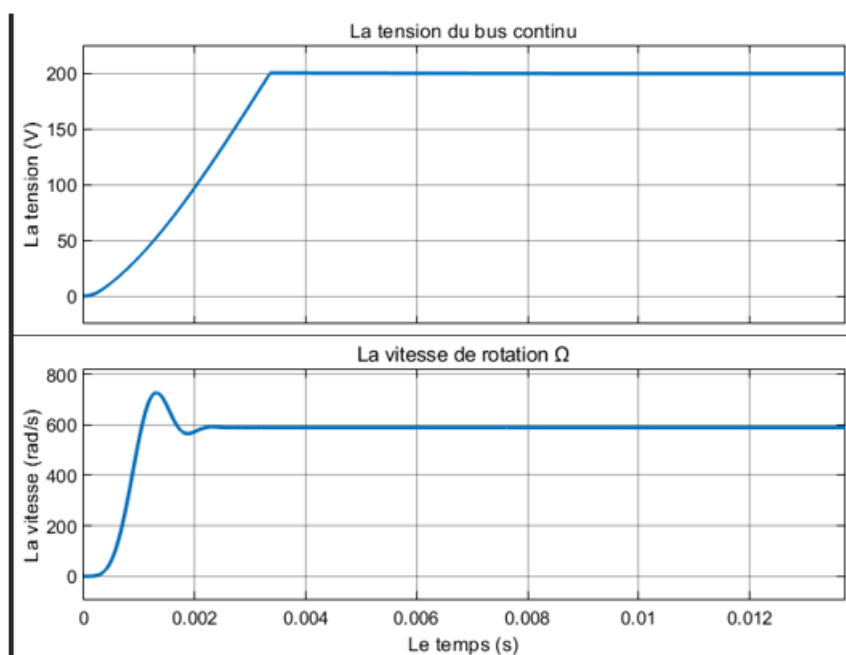


FIGURE 3.24 – Allure de la tension du bus continu et la vitesse de rotation.

Interprétation des résultats :

La tension du bus continu augmente progressivement puis se stabilise à 200 V. On constate également que la vitesse de rotation augmente jusqu'à 700 rad/s, puis diminue et se stabilise à 600 rad/s.

TABLE 3.1 – Tableau présentant les principales caractéristiques de la chaîne de traction pour différentes situations et régimes de conduite.

Situation	Terrain plat vitesse de 90 km/h	Terrain plat vitesse de 50 km/h	Rampe de 8% vitesse de 50 km/h
Force de résistance à la pénétration dans l'air $F_{air}(N)$	350	108	108
Force de résistance au roulement $FR^R (N)$	450	258	258
$m \cdot g \cdot \sin(\alpha)(N)$	0	0	1100
Force totale $F(N)$	800	366	1466
Couple $C_m(N_m)$	29.6	13.5	54.2
Vitesse de rotation (tr/mn)	7000	3890	3890
Puissance à fournir par le moteur (kW)	21.7	5.5	22.1
La f.e.m $E(v)$	403	224	22
La tension $U(v)$	422	233	252
Le courant d'induit $I(A)$	74.58	36.12	112
La vitesse du véhicule(m/s)	25	13.90	13.90

Ce tableau présente les différentes valeurs des forces de résistance à l'avancement du véhicule pour différentes vitesses et situations, telles que : conduite sur un terrain plat avec

une vitesse de 90km/h, conduite sur un terrain plat avec une vitesse de 50km/h, conduite sur une route présentant une rampe de 8% avec une vitesse de 50km/h.

Interprétation des résultats :

On remarque que pour un terrain plat à 90 km/h, la force aérodynamique augmente considérablement à 350 N, par rapport à 108 N à 50 km/h. Cela souligne l'importance de la vitesse sur la résistance aérodynamique, ce qui peut influencer l'efficacité énergétique du véhicule à grande vitesse. De plus, la présence d'une pente de 8% à 50 km/h engage une force supplémentaire de 1100 N due à la gravité, illustrant les défis accrus associés à la montée en pente. En revanche, la force de résistance au roulement reste constante à 258 N, quelle que soit la condition, indiquant que cet élément n'est pas affecté par la vitesse ou l'inclinaison. Ces résultats suggèrent que pour optimiser la performance et l'autonomie d'un véhicule électrique, il est crucial de prendre en compte les variations de vitesse et de terrain, notamment en matière de résistance aérodynamique et de forces gravitationnelles.

5 Présentation d'un exemple d'un modèle du véhicule électrique disponible dans la bibliothèque du Matlab

Dans cette section, nous allons explorer en détail un exemple de modèle d'un véhicule électrique extrait de la bibliothèque MATLAB. Ce modèle illustre les composants essentiels et leur interconnexion pour simuler le fonctionnement d'un véhicule électrique.

Le schéma bloc complet de ce modèle est présenté dans la Figure 3.25, où chaque bloc représente une partie intégrante du système. Les différents blocs de ce schéma sont détaillés dans la partie suivante.

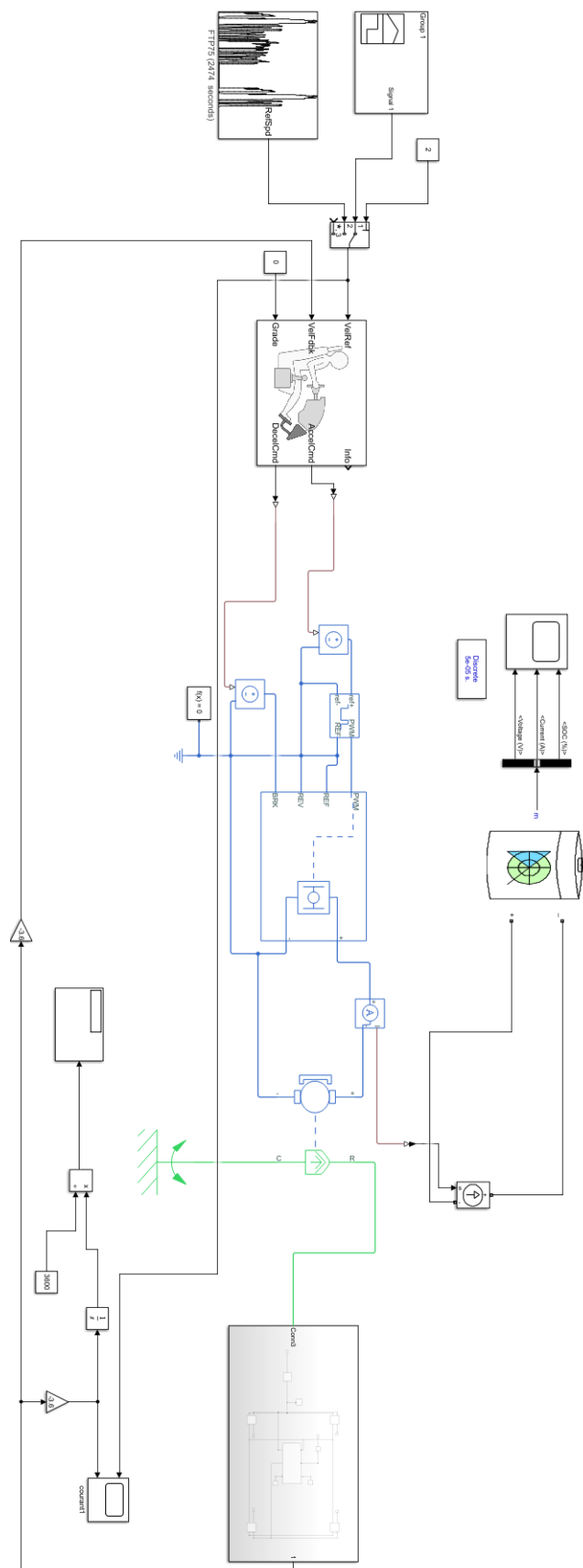


FIGURE 3.25 – Le schéma bloc de la chaîne de traction disponible dans la bibliothèque du Matlab

5.1 Pilote longitudinal

Le bloc Pilote longitudinal met en œuvre un contrôleur de suivi de vitesse longitudinale. Il utilise les vitesses de référence et de retour pour générer des commandes d'accélération et de freinage normalisées, variant de 0 à 1. Ce bloc peut être utilisé pour modéliser la réponse dynamique d'un conducteur ou pour générer les commandes nécessaires au suivi d'un cycle de conduite longitudinale[24].

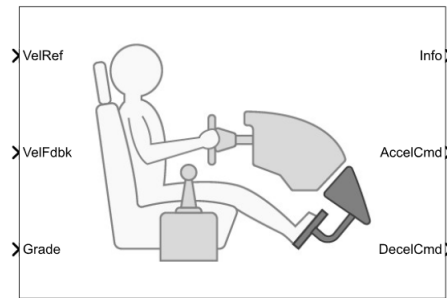


FIGURE 3.26 – Longitudinal Driver.

5.2 Commande du moteur

Un circuit électronique est utilisé pour contrôler la direction et la vitesse d'un moteur à courant continu (DC). Il permet d'inverser la polarité de la tension appliquée au moteur, ce qui change la direction de rotation de ce dernier[24].

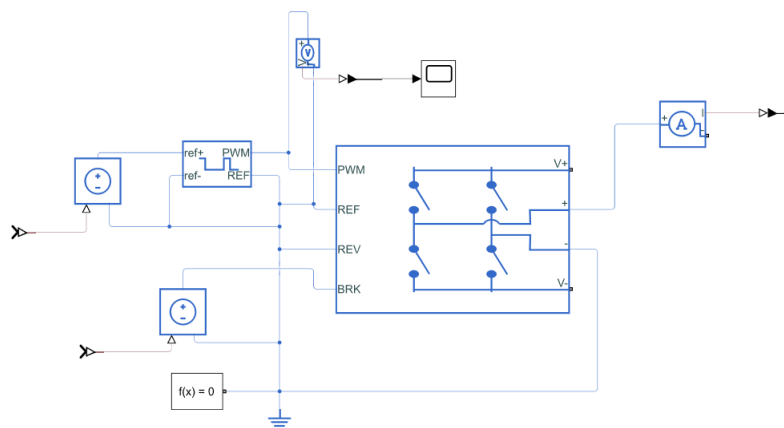


FIGURE 3.27 – Commande de moteur.

5.3 H-Bridge

Un H-pont est généralement constitué de quatre transistors de puissance (MOSFET ou bipolaires) disposés en configuration en forme de H. Ces transistors sont contrôlés par des

signaux logiques, souvent émis par un microcontrôleur ou un circuit de commande, afin d'activer ou de désactiver les transistors et de réguler la tension appliquée au moteur[24].

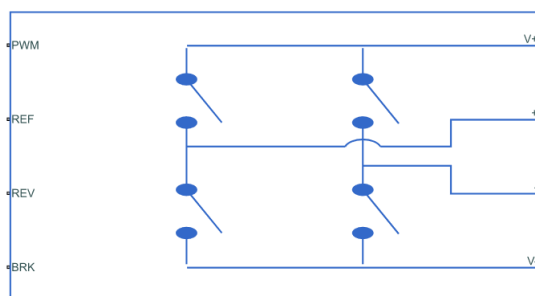


FIGURE 3.28 – H-Bridge.

5.4 Contrôle MLI

Ce bloc génère une tension modulée en largeur d'impulsion (PWM) sur les ports PWM et REF. La tension de sortie est nulle lorsque l'impulsion est basse et égale au paramètre d'amplitude de la tension de sortie lorsqu'elle est haute. Le rapport cyclique est déterminé par la valeur d'entrée. Pour basculer entre les ports électriques +ref/-ref et le signal physique u afin de spécifier la valeur d'entrée, cliquez avec le bouton droit sur le bloc et sélectionnez Simscape -> Choix de blocs[24].

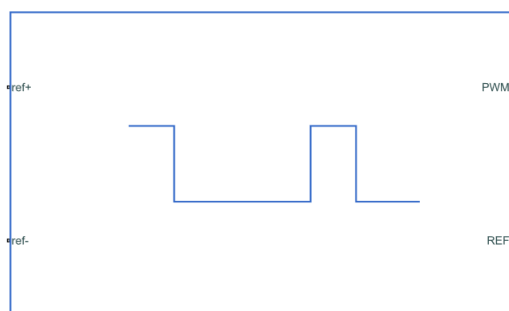


FIGURE 3.29 – Controlled PWM Voltage.

5.5 Moteur à courant continu

Ce bloc représente les caractéristiques électriques et de couple d'un moteur à courant continu. Il suppose qu'aucune énergie électromagnétique n'est perdue, de sorte que les constantes de force contre-électromotrice et de couple ont la même valeur numérique en unités SI. Les paramètres du moteur peuvent être spécifiés directement ou dérivés de la vitesse à vide et du couple à l'arrêt. Si aucune information n'est disponible concernant l'inductance d'induit, ce paramètre peut être réglé sur une petite valeur non nulle[24].

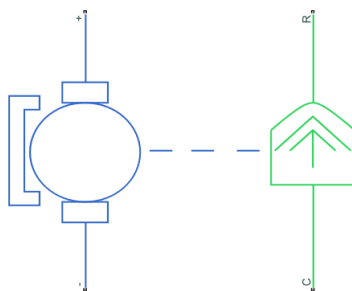


FIGURE 3.30 – DC Motor.

5.6 Caisse du véhicule électrique

5.6.1 Le pneu Magic Formula

Le bloc Tire (Magic Formula) modélise un pneu en utilisant la Magic Formula, une équation empirique avec quatre coefficients d'ajustement qui détermine le comportement longitudinal du pneu. Ce bloc peut représenter la dynamique des pneus sur une chaussée constante ou variable. L'orientation longitudinale du pneu correspond à sa direction de déplacement lorsqu'il roule sur la chaussée. Ce bloc est un composant fondé sur l'interaction pneu-route basée sur la Magic Formula. Pour améliorer la précision du modèle de pneu, il est possible de spécifier des caractéristiques telles que la compliance du pneu, son inertie et la résistance au roulement. Cependant, l'intégration de ces propriétés peut complexifier le modèle de pneu et ralentir la simulation. Si la simulation doit être en temps réel ou si le modèle est destiné à une utilisation dans une simulation matérielle en boucle fermée (HIL), il peut être judicieux de négliger la compliance et l'inertie des pneus[24].

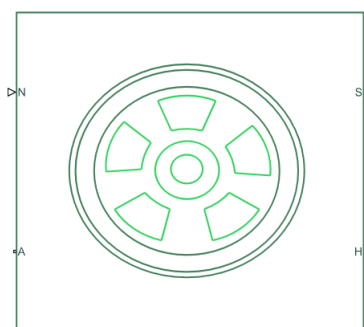


FIGURE 3.31 – Tire (Magic Formula).

5.6.2 Véhicule body

Le bloc Carrosserie du véhicule représente une carrosserie à deux essieux en mouvement longitudinal, où le véhicule peut avoir un nombre égal ou différent de roues sur chaque essieu, par exemple, deux roues sur l'essieu avant et une roue sur l'essieu arrière. Les roues

FIGURE 3.33 – Simple Gear.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé les composants de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, qui comprend un moteur à courant continu, un convertisseur, un régulateur, et enfin la validation du modèle dynamique du véhicule. Nous avons ensuite simulé la chaîne de traction, concluant par la présentation des résultats obtenus. Par la suite, nous avons exploré le système d'alimentation hybride constitué d'une batterie Li-Ion et d'une pile à combustible, ainsi que le choix de leur technique de gestion, accompagné des résultats de simulation. Enfin, nous avons terminé par la présentation d'un exemple d'un modèle du véhicule électrique disponible sous MATLAB.

Des travaux supplémentaires restent à développer dans le cadre des perspectives, notamment l'hybridation des sources d'énergie, la gestion de l'énergie et la validation expérimentale.

Conclusion générale

Ce mémoire s'intéresse à l'étude, à la modélisation et à la simulation d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique, en le plaçant dans le cadre de la solution stratégique pour relever un des grands défis énergétiques de notre avenir : l'impact environnemental des transports.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art complet des véhicules électriques, en explorant leurs diverses configurations, leur architecture et les éléments clés de leur système de propulsion. Ce chapitre traite également du fonctionnement fondamental de ces véhicules ainsi que des défis liés aux évolutions économiques et environnementales. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les modèles des différents composants de la chaîne de traction, en commençant par le modèle du moteur à courant continu et son convertisseur statique. Nous avons ensuite synthétisé les régulateurs des boucles de courant et de vitesse, avant d'identifier et de décrire les diverses forces de résistance à l'avancement du véhicule, qui interviennent dans le modèle dynamique. Enfin, nous avons examiné les différentes sources d'énergie électrique.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations de la chaîne de traction pour valider les modèles développés dans le chapitre précédent. Nous avons débuté par la simulation du modèle du moteur électrique et de son convertisseur statique, suivie de la présentation des boucles de régulation du courant et de la vitesse. Ensuite, le modèle dynamique du véhicule a été validé et connecté à celui du moteur de traction pour former un modèle complet de la chaîne de traction. Pour conclure, nous avons présenté les résultats de simulation des sources d'alimentation avec leur technique de gestion. Une section supplémentaire a été consacrée à un exemple de modèle de véhicule électrique disponible dans la bibliothèque MATLAB.

Des recherches supplémentaires doivent être menées dans le cadre des perspectives, en particulier sur l'hybridation des sources d'énergie, la gestion de l'énergie et la validation expérimentale.

Annexe

Paramètres du moteur	Valeur
Pn	20 (kW)
Un	200 (V)
Nn	4667 (tr/min)
Nmax	1.5 * Nn
n	0.88
R	0.42 (Ohm)
L	0.05 (H)
J	0.08 (kg·m ²)
f	0.015
In	56.82 (A)
I _{max}	2*I _n (A)
K	1.76
Ta	L/R (s)
Tm	J/f (s)
Paramètres du convertisseur statique	
Gc	Un/10
Tc	0.05e-3 (s)
Kc	10/I _{max}
Paramètres des régulateurs	
Tip	Ta (s)
Kpi	(Ta * R) / (2 * Tc * Gc * Kc)
Kw	10/Ω _{max}
Tiw	Tm
Kpw	(Tm * f * Kc) / (4 * Tc * K * Kw)
Paramètres du véhicule	
m	1400 (kg)
V _{max}	90 (km/h)
a	$\frac{V_{\max} * 1000}{3600} / 18$ (m/s ²)
sc	0.86 (m ²)
p	1.3 (kg/m ³)
g	9.81 (m/s ²)
sinalpha	0.08
D	0.5 (m)
R	D/2 (m)
Ω	$2\pi N_{\max} / 60$ (rad/s)
Vitesse de la roue	$\frac{V_{\max} * 1000}{3600} / R$ (m/s)
Rapport de réduction	V _m /V _r
n _{tr}	0.92
Couple résistant de la roue C _{rr}	F _t * R
Cr	C _{rr} / (r _r * n _{tr})
Paramètres de la batterie li-ion	
Vn	700 (v)
Cb	50 (Ah)
état de charge	55%
Paramètres de la PaC	
Vn	630 (v)
Pn(pac)	25 (kW)
état de charge	63%
Paramètres du filtre passe pas	
Gf	1
Tf	0.01

TABLE 3.2 – Tableau des paramètres de la chaîne de traction du véhicule électrique

Bibliographie

- [1] *Le Guide de la voiture électrique-G-Wiz*. 2010.
- [2] Historique du véhicule électrique. *Étudiants en route vers les sciences*, page 7, 2012.
- [3] *Évaluation environnementale des véhicules électriques légers*. 2017.
- [4] C. D. Anderson and J. Anderson. *Electric and Hybrid Cars*. McFarland, 3 2010.
- [5] I. Baadji. Optimisation de la commande d'un variateur de vitesse à base d'une pile pemfc. Mémoire de magister, Université Mohamed Boudiaf-Msila, 2014.
- [6] J. Beretta. *Le génie électrique automobile*. Hermes science publications, 2005.
- [7] J. Bernar. *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Décembre 2007.
- [8] J.-J. Cornaert. *L'avenir de l'automobile*. Armand Colin, 2010.
- [9] B. V. Dang. *Conception d'une interface d'électronique de puissance pour pile à combustible*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [10] F. Deflosse. Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique. *Ingénieur*, 1998.
- [11] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong, S. Kreckelbergh, S. Bacha, and A. Florescu. *Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique*. PhD thesis, Thèse de doctorat du Grenoble INP, Grenoble, 2012.
- [12] B. Gasbaoui. *Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Électrique à Deux Roues Motrices*. PhD thesis, Université de Béchar, 2012.
- [13] L. Guzzella and A. Sciarretta. *Vehicle Propulsion Systems : Introduction to Modeling and Optimization*. 2013.
- [14] D. Hernández-Torres, C. Turpin, X. Roboam, and B. Sareni. Modélisation en flux d'énergie d'une batterie li-ion en vue d'une optimisation technico économique d'un micro-réseau intelligent. In *Symposium de Génie Electrique (SGE'16)-EF-EPF-MGE 2016*, 2016.
- [15] K. Houacine. *Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule électronique*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [16] I. Husain. *Electric and Hybrid Vehicles : Design Fundamentals*. CRC Press, 2003.
- [17] R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen, and A. Kojic. Electrochemical model based observer design for a lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(2) :289–301, 2013.
- [18] R. Maddala. *Modeling of Hybrid Electric Vehicle Batteries*. PhD thesis, Texas Tech University, 2003.
- [19] J. T. Pukrushpan. *Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors*. PhD thesis, University of Michigan Ann Arbor, Michigan, USA, 2003.
- [20] B. Sarrazin. *Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [21] P. Sharma and T. Bhatti. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 51(12) :2901–2912, 2010.
- [22] D. Smith. Electric vehicle types, 2017.
- [23] N. P. Suh and D. H. Cho. *The on-line electric vehicle*. Springer, 4 2017.
- [24] I. The MathWorks. *MATLAB Documentation*, 2021.
- [25] H. Tschöke. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen*. Springer-Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [26] X. Xue, K. Cheng, and N. Cheung. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, pages 1–6. IEEE, 2008.